

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İLE TEMİN EDİLEN ÇOK
BANTLI GÖRÜNTÜLER VE LİDAR VERİLERİ KULLANILARAK
AĞAÇ SAĞLIKLARININ OTOMATİK TESPİTİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Batuhan GÜMRÜKÇÜ

HAZİRAN 2025
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İLE TEMİN EDİLEN ÇOK
BANTLI GÖRÜNTÜLER VE LİDAR VERİLERİ KULLANILARAK
AĞAÇ SAĞLIKLARININ OTOMATİK TESPİTİ**

Batuhan GÜMRÜKÇÜ

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"HARİTA YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 / 06 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 27 / 06 / 2025

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Hayrettin ACAR

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İLE TEMİN EDİLEN ÇOK BANTLI GÖRÜNTÜLER VE LİDAR VERİLERİ KULLANILARAK AĞAÇ SAĞLIKLARININ OTOMATİK TESPİTİ” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hayrettin ACAR’a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Fevzi KARSLI ’ya ve Sayın Doç. Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DİHKAN, eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma ve ortak olarak çalışmalar yürüttüğümüz ve tez çalışması süresinde de hiçbir yardımdan kaçınmayan arkadaşlarım Dr. Ahmad Shakib SAHAK, Öğr. Gör. Murat BAHADIR, Öğr. Gör. Merve YILDIRIM, Öğr. Gör. Ömer CANÖZÜ, Harita Yüksek Mühendisi Kutluhan GÜMRÜKÇÜOĞLU, Harita Yüksek Mühendisi Feride Seçil YILDIRIM, Veri Tabanı Teknisyeni Oğulcan SÖNMEZ’e ve veri temini konusunda destek sağlayan Trabzon Orman Bölge Müdürlüğüne teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen Harita Mühendisliği Bölümü’ndeki tüm değerli hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararında arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Zehra GÜMRÜKÇÜ ve babam Aydın GÜMRÜKÇÜ ’ye, kardeşim Oğuzhan GÜMRÜKÇÜ ’ye teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Batuhan GÜMRÜKÇÜ

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İLE TEMİN EDİLEN ÇOK BANTLI GÖRÜNTÜLER VE LİDAR VERİLERİ KULLANILARAK AĞAÇ SAĞLIKLARININ OTOMATİK TESPİTİ” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hayrettin ACAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 27/06/2025

Batuhan GÜMRÜKÇÜ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Literatür Araştırması	11
1.2. Temel Kavramlar.....	24
1.2.1. Fotogrametri.....	24
1.2.2. İnsansız Hava Araçları Tabanlı Fotogrametri	25
1.2.3. Multispektral Görüntü.....	28
1.2.4. Üç Boyutlu Nokta Bulutu	29
1.2.5. İlgi Alanı (Region Of Interest ROI).....	31
1.2.6. Ağaç Metrikleri	31
1.2.7. Zemin Filtreleme (SMRF)	35
1.2.8. MCWS	37
1.2.9. NDVI ve NDRE İndeksleri	38
1.2.10. Piksel Bazlı Doğruluk Analizi	39
1.2.11. Nesne Tabanlı Doğruluk Analizi	41
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	43
2.1. Çalışma Alanı	45
2.2. Üretilen Veriler.....	46
2.2.1. Çok Bantlı Görüntüler.....	47
2.2.2. LiDAR Nokta Bulutu Verisi	48
2.3. Veri Hazırlık Aşaması	48
2.4. Kanopi Yükseklik Modeli Oluşturma ve Ağaç Taç Segmentasyonu.....	49
2.5. Ağaç Taç Sınırlarının Belirlenmesi Ağaç Taç Sınırlarının Çok Bantlı Görüntü Üzerinde Belirlenmesi.....	52
2.6. Taç Bazlı İndis Uygulaması	54

2.7. Taç Merkezi Bazlı Uyarlanabilir Pencere İndis Uygulaması.....	57
2.8. Taç Merkezi Bazlı İndis Uygulaması.....	63
2.9. Nesne Tabanlı Doğruluk Analizi.....	64
3. BULGULAR.....	65
4. TARTIŞMA	83
4.1. Uyarlanabilir Pencere İndis Çalışmasını Etkileyen Faktörlerin İrdelenmesi	84
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	86
6. KAYNAKLAR	88
ÖZGEÇMİŞ	



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İLE TEMİN EDİLEN ÇOK BANTLI GÖRÜNTÜLER VE LİDAR VERİLERİ KULLANILARAK AĞAÇ SAĞLIKLARININ OTOMATİK TESPİTİ

Batuhan GÜMRÜKÇÜ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hayrettin ACAR
2025, 96 Sayfa

Bu çalışmada, çok bantlı görüntüler ve LiDAR nokta bulutu birlikte kullanılarak ağaç sağlıklarının otomatik tespiti gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırma çalışmalarında hedeflenen objelerin metrik özelliklerine uyarlanabilen pencere tabanlı yeni bir yöntem önerilmiştir. Çalışmada veri seti olarak Gümüşhane ili Şiran ilçesi Kozagaç köyü mevkiinde sarıçam orman alanının havadan LiDAR verisi ve çok bantlı görüntüler kullanılmıştır. Önerilen yaklaşım, her bir ağaç taç alanı için dinamik olarak oluşturulan analiz pencereleri içinde spektral, konumsal, metrik özellikleri birlikte kullanarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirmektedir. Bu çerçevede, normalize edilmiş vejetasyon indeksi (NDVI), normalize edilmiş fark kırmızı kenar indeksi (NDRE) spektral analiz yöntemleri, ağaç taç genişliği ve taç alanı metrikleri ile konumsal nicelikler birlikte değerlendirilmiştir. Önerilen akış şeması kapsamında, MATLAB yazılım ortamındaki tamamen otomatik süreç, Kanopi Yükseklik Modeli (CHM) kullanılarak bireysel ağaçlar tespit edilmesinin sonrasında her bir ağaç için ilgili metriklerin belirlenerek uygun ilgi alanı pencereleri oluşturulmaktadır. Elde edilen ilgi alanı pencerelerinde spektral analizler uygulanarak odak objeye yönelik sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Nesne tabanlı doğruluk analizine göre en yüksek sınıflandırma doğruluğu NDVI analizi için ortalama %80, NDRE analizi için %65 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bitki Sağlığı, LiDAR Nokta Bulutu, Çok Bantlı Görüntü, Ağaç Taç Sınıflandırma

SUMMARY

**AUTOMATIC DETECTION OF TREE HEALTH USING MULTISPECTRAL
IMAGERY AND LIDAR DATA ACQUIRED BY UNMANNED AERIAL VEHICLES**

Batuhan GÜMRÜKÇÜ

Karadeniz Technical University
Institute Of Science
Department of Geomatics Engineering
Supervisor: Assistant Professor Hayrettin ACAR
2025, 96 Pages

In this study, tree health was automatically detected by using multispectral images and LiDAR point cloud data together. A new window-based method, which can be adapted to the morphological characteristics of the target objects in classification studies, was proposed. As the dataset, airborne LiDAR data and multispectral images of a Scots pine forest area located in Kozagaç village, Şiran district, Gümüşhane province, were used. The proposed approach performs classification by simultaneously utilizing spectral, spatial, and morphological features within dynamically generated analysis windows for each tree crown area. In this context, spectral analysis methods such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Normalized Difference Red Edge Index (NDRE), as well as tree crown width, crown area metrics, and spatial attributes were evaluated together. Within the proposed workflow, a fully automated process in the MATLAB environment was used, where individual trees were detected using the Canopy Height Model (CHM), and appropriate regions of interest (ROI) windows were generated by determining the relevant morphological metrics for each tree. Spectral analyses were applied within the obtained ROI windows, and object-focused classification was carried out. According to the object-based accuracy analysis, the highest classification accuracy was calculated as an average of 80% for the NDVI analysis and 65% for the NDRE analysis.

Key Words: Plant Health, LiDAR Point Cloud, Multispectral Imagery, Tree Crown Classification

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. a) İncelenen Makalelerin Konularına Göre İstatistikleri b) İncelenen Makalelerin Yıllara Göre İstatistikleri	11
Şekil 2. İncelenilen Makalelerde Kullanılan Veriler	12
Şekil 3. Fotogrametrik Veri Alım Geometrisi ve Matematiksel Modeli	26
Şekil 4. Ağaç Parametrelerinin Şeması (Bahadır, 2023)	33
Şekil 5. Çok Sınıflı Bir Sınıflandırmaya, 3×3 boyutuna sahip bir karışıklık matrisi (confusion matrix)	42
Şekil 6. İş Akış Şeması	44
Şekil 7. Çalışma Alanı (Gümüşhane Kozağaç)	45
Şekil 8. Çalışma Alanı Ortofoto Görüntüsü (Gümüşhane Tomara)	47
Şekil 9. a) Ağaçlık Alan LiDAR nokta bulutu 2B b)3B görünüm	48
Şekil 10. Zemin Filtreleme İşlemi (Mor renk zemin üstü noktalar, yeşil renk zemin noktaları).....	49
Şekil 11. Orman Metriklerinin (a) Kanopi Örtüsü, (b) Boşluk Fraksiyonu, (c) Boşluk Fraksiyonu çıkarımı	50
Şekil 12. LiDAR Nokta Bulutundan Ağaç Tepelerini Belirleme.....	51
Şekil 13. Bireysel Ağaç Taç Segmentasyonu	52
Şekil 14. Ağaç Taç Sınırlarının Çalışma Alanında Temsili	53
Şekil 15. Çalışma alanında tespit edilen 92 numaralı ağaca ait taç sınırları	53
Şekil 16. Boyutları m satır n sütun boyutlu bir ağaç taç kesiti	55
Şekil 17. Doğrudan Alınan Arazi Verisine Uygulanan İşlem ve Ağaç Taç Sınırlarına Uygulanan İşlemin Karşılaştırılması	56
Şekil 18. (a) Çalışma Alanında Tespit Edilen 57 numaralı Ağaç Tacı (b) taç bazlı uygulanan eşik değerli NDVI analizi sonucu	56
Şekil 19. 57 numaralı ağaç taç sınırının görüntüsü	57
Şekil 20. Bireysel Ağaçların ağırlık merkezi ve sınırlarının gösterimi	59
Şekil 21. Piksel koordinat sisteminde ağırlık merkezi noktalarının gösterimi	60
Şekil 22. 65 (1) ve 247 (2) numaralı ağaç taç ağırlık merkezlerine uygulanan ROI gösterimi	60
Şekil 23. Değişken koşullara Göre ROI durumları.....	61
Şekil 24. Örnek 324 (2,4) ve 162 (1,3) no'lu ağaç taçlarına İlgi alanı penceresi atanmasında izlenilen iş akışı	63
Şekil 25. 162 (a) ve 324 (b) nolu ağaç taç ağırlık merkezlerine uygulanan ROI gösterimi	64

Şekil 26. Operatör Destekli Sınıflandırılmış Veri (Kırmızı Sağlıksız, Mavi Yarı sağlıklı, Yeşil Sağlıklı Sınıfı Temsil Eder)	66
Şekil 27. Ağaç Taç Sınırlarına Uygulanan NDRE Sınıflandırma Sonuçları (Kırmızı Sağlıksız, Mavi Yarı sağlıklı, Yeşil Sağlıklı)	67
Şekil 28. Ağaç Taç Sınırlarına Uygulanan NDVI Sınıflandırma Sonuçları (Kırmızı Sağlıksız, Mavi Yarı Sağlıklı, Yeşil Sağlıklı).....	67
Şekil 29. Önerilen Yaklaşım ile NDRE Sınıflandırma Sonucu (Kırmızı Sağlıksız, Mavi Yarı Sağlıklı, Yeşil Sağlıklı).....	69
Şekil 30. Önerilen Yaklaşım ile NDVI Sınıflandırma Sonucu (Kırmızı Sağlıksız, Mavi Yarı Sağlıklı, Yeşil Sağlıklı)	69
Şekil 31. Önerilen Yöntem Kullanılarak Üretilen NDRE Sınıflandırma Haritasının Doğrulama Verisi ile Çakıştırılması Sonucu Elde Edilen Harita (Yeşil Uyuşan, Kırmızı Farklı Sonuçları İfade Eder).....	70
Şekil 32. Önerilen yöntem kullanılarak üretilen NDVI sınıflandırma haritasının doğrulama Verisi ile Çakıştırılması Sonucu Elde Edilen Harita (Yeşil Uyuşan, Kırmızı Farklı Sonuçları İfade Eder)	71
Şekil 33. Ağaç Taç Sınırları Kullanılarak Üretilen NDRE Sınıflandırma Haritasının Doğrulama Verisi ile Çakıştırılması Sonucu Elde Edilen Harita (Yeşil Uyuşan, Kırmızı Farklı Sonuçları İfade Eder).....	72
Şekil 34. Ağaç Taç Sınırları Kullanılarak Üretilen NDVI Sınıflandırma Haritasının Doğrulama Verisi ile Çakıştırılması Sonucu Elde Edilen Harita, (Yeşil Uyuşan, Kırmızı Farklı Sonuçları İfade Eder).....	73

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Türkiye Orman Alanlarının Aslı Ağaç Türlerine Göre Dağılımı.....	4
Tablo 2. Micsense Altum Multispektral Kamera Özellikleri	46
Tablo 3. DJI Zenmuse L1 Sensör Özellikleri	47
Tablo 4. Kullanılan Ortofoto Özellikleri	48
Tablo 5. Standart 35×35 Piksel Boyutları Kullanılarak Uyarlanabilir İlgi Alanı Penceresiyle 3 Sınıflı Kontrol.....	74
Tablo 6. Standart 35×35 Piksel Boyutları Kullanılarak Uyarlanabilir İlgi Alanı Penceresiyle 2 Sınıflı Kontrol.....	79
Tablo 7. 15×15 Piksel boyutu kullanılarak Uyarlanabilir Pencere Yöntemi ile Sabit Penceresiyle 2 Sınıflı Kontrol.....	80
Tablo 8. 10×10 Piksel boyutu kullanılarak Uyarlanabilir Pencere Yöntemi ile Sabit Penceresiyle 2 Sınıflı Kontrol.....	80

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

2B/3B	: İki/Üç Boyutlu
AB/TH	: Ağaç Boyu (Tree Height)
ALS	: Hava LiDAR Sistemi (Airborne LiDAR System)
C/CENTROID	: Geometrik Şekil Ortalama Merkez
CNN	: Evrişimli Sinir Ağı
CR	: Taç Çapı
DBSCAN	: Gürültülü Uygulamaların Yoğunluk Tabanlı Uzamsal Kümelenmesi
GYÇ/DBH	: Göğüs Yüksekliğindeki Çap (Diameter Breast Height)
KH/CV	: Kanopi/Taç Hacmi (Canopy Height Model)
KYM/CHM	: Kanopi Yükseklik Modeli (Canopy Height Model)
LiDAR	: Işık Algılama ve Mesafe Belirleme (Light Detection and Ranging)
LM	: Lokal/ Yerel Maksimum
MCWS	: İşaretçi Kontrollü Havza Segmentasyonu
MLS	: Mobil LiDAR Sistemi (Mobile LiDAR System)
NDRE	: Normalize Edilmiş Fark Kırmızı Kenar İndeksi (Normalized Difference Red Edge Index)
NDVI	: Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (Normalized Difference Vegetation Index)
POLYGON	: Dünya Alanını Temsil Eden Vektör Veri
RF	: Rastgele Orman Sınıflandırıcısı
ROI	: İlgi Alanı/Odak Alanı Penceresi
SMRF	: Basit Metrik Filtre (Simple Morphological Filter)
SYM	: Sayısal Yüzey Modeli
TG/CW	: Taç Genişliği (Crown Width)
TLS	: Karasal/Yersel LiDAR Sistemi (Terrain LiDAR System)
TTH/BCV	: Taç Taban Yüksekliği (Crown Base Volume)
TTY/CBH	: Taç Taban Yüksekliği (Crown Base Height)
WS	: Havza Bölütü/Segmentasyonu (Watershed Segmentation)

1. GENEL BİLGİLER

Tarih boyunca yaşamın her alanında bulunan ormanlar, insan oğlunun barınma, beslenme, solunum gibi temel ihtiyaçlarının karşılanmasında oldukça etkin bir role sahip olmuştur. Endüstriyel gelişim ve yenilenebilir enerji kaynaklarından biyokütle enerjisinin, yapı taşı olan ağaçlar, yalnızca insanların değil ekolojik dengenin paydaşları olan diğer canlı türleri ve dünyanın sürdürülebilir doğası için vazgeçilmez bir unsurdur.

Yaşamın ayrılmaz parçası olan ağaçlar, içinde bulunduğu fotosentez ve solunum döngüsü, ürettiği ve tükettiği bileşenler itibarıyla yaşam kaynağı gazların üretilmesinde rol almaktadırlar. Ağaçlar, atmosferde sera etkisi oluşturan ve zehirli etkisi olan; karbon dioksit (CO_2) sülfür dioksit (SO_2), nitroz oksit (N_2O), amonyak (NH_3), fosil yakıt kullanımı sonucu oluşan, sera gazlarını filtreleyerek küresel ısınma ve iklim değişikliği etkilerine karşı ekosistemi korumaktadır. Kökleriyle toprağa tutunan ve topraktan beslenen ağaçlar, erozyon, deprem gibi doğal afetlerin etkilerinin azaltılmasında önemli bir etken olmaktadır. Canlı ekosistemi ve kent alanlarının ısı dengesinin korunabilmesinde, güneş ışınlarının zararlı etkilerinin azaltılabilmesinde, dünya atmosferinin korunabilmesinde, temiz su kaynağının sağlanabilmesinde, etkin rol alan ağaçlar; canlıların barınabilme ve beslenme ihtiyaçlarında da önemli katkılar sağlamaktadırlar (Akın, 2006).

Endüstriyel ihtiyaçların karşılanması maksadıyla kısa idare süreli ağaç yetiştirme uygulaması dünyanın pek çok yerinde farklı isimlerle gerçekleştirilmektedir. İsveç'te kısa idare süreli orman, enerji ormanı, Kuzey Amerika'da kısa idare süreli baltalık, kısa idare süreli yoğun kültür ve İngiltere'de kısa idare süreli baltalık gibi farklı isimlerle gerçekleştirilen benzer amaçlı uygulamalar bulunmaktadır. Kısa idare süreli ağaç yetiştirme uygulaması için ilk çalışmalar 1960'lı yılların ortalarında İsveç ve Kuzey Amerika gibi ülkelerde söğüt ve çınar yetiştirme çabalarıyla başlayarak, kâğıt endüstrisi için lif yetiştirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir (Mitchell vd., 1999) (Verwijst ve Telenius, 1999). Dünya enerji krizi (1970) döneminde kavak ve söğüt gibi hızlı büyüyen yapraklı ağaç türleri daha etkin kullanıldığı, ormancılıktan çok tarımsal uygulamalardaki yetiştirme tarzına benzer şekilde (20000 ağaç/ha), enerji üretim amaçlı odun biyokütlesi üretimi gerçekleştirilmiştir (Mitchell vd., 1999). Yenilenebilir enerji kaynakları; sürdürülebilir ekonomi ve ülkelerin dışa bağımlılıkları gibi konular açısından büyük öneme sahip

olmaktadır. Bu açıdan ülkemizde de baltalık alanlarda yapılan ıslah çalışmaları, enerji ormancılığını gündeme getirmiştir (Tilki ve Çiçek, 2003).

Zengin biyolojik çeşitliliği barındıran, yaşamın kaynağı ve ekolojik dengenin yapı taşı orman ekosistemleri, sağladıkları hizmetler bakımından insan yaşamı için oldukça büyük bir öneme sahiptirler. Biyolojik çeşitliliğin korunması ve geliştirilmesi konusu; baskın olmayan türün korunumu, istila durumunun tespiti ve engellenebilmesine dayanmaktadır. Bu amaçla orman ekosistemlerinin korunan alan olarak ele alınması hızlanarak ülkemiz içindeki dağılımı artırılmaktadır. Ancak biyolojik çeşitliliğin korunduğu alan dışındaki bölgelerde de gereken hassasiyetin gösterilmesi ile ancak mümkün olabilmektedir. Baskın türün istilacı türe dönüşmesi durumunda aynı ekosistemin paydaşı olan canlılar da bu değişimden etkilenecektir. Bu tür değişimlerin önüne geçilebilmesi çevresel denetimler, canlı yaşamlarının takibi, koruma alanları ekosistem tabanlı planlama yaklaşımlarıyla mümkün olabilmektedir (Özçelik, 2006). Gün geçtikçe zengin biyolojik çeşitliliğe sahip orman ekosistemleri çeşitli tahribatlara uğrayarak eksilmekte, yok olmaktadır. Bu duruma karşın çeşitli dünya ülkeleri tarafından, korunması ve sürdürülebilirliği için yoğun uğraşlar verilmektedir. İnsan oğlu ihtiyaç duyduğu; barınmayı, temel sarf malzemelerini, korunmayı, sağlığı, afetlere karşı önlemi, endüstriyel getirileri, sosyokültürel pek çok faydayı orman ekosistemi içinde keşfetmiştir.

Avrupa komisyonu, Avrupa biyoekonomisinin yıllık cirosunun yaklaşık 2 trilyon Euro olduğunu ve 22 milyon kişinin istihdam edildiğini tahmin etmektedir. Bu istihdam AB iş gücünün yaklaşık %9'unu oluşturmaktadır (Hyypä vd., 2022) (Hetemäki vd., 2014). Birçok ülkede sera gazının olumsuz etkilerinin önüne geçilebilmesi için çeşitli doğa koruma organizasyonları faaliyete geçirilmektedir. Bu faaliyetler arasında orman yönetim uygulamaları, ağaç dikme kampanyaları ve orman tahribatlarının takibi en önde gelen örnekler olmaktadır. Ormanların tahribatının önüne geçilmesinin ve ağaç dikim çalışmalarının belirleyici faktörlerinden birisi de orman envanterinin analizinin gerçekleştirilerek bölge ekosistemine ait verilerin sağlanması olmaktadır. Bu nedenle orman sağlığının güncel olarak izlenebilmesi ve çevreye ait analizlerin gerçekleştirilebilmesi, sürdürülebilir ekosistem sağlığı için büyük önem taşımaktadır (Pearse vd., 2018).

Ülkemizde orman alanlarının büyük çoğunluğu Orman Genel Müdürlüğü'ne (OGM) ait olup yönetimi kanunlar ile belirlenmektedir. Ormanların işletilmesi ve ilgili çalışmaları orman amenajman planlarına bağlı olarak gerçekleştirilmektedir. Ormanlar işletme şekilleri

bakımından; koru, baltalık, korulu baltalık olarak ayrılmaktadır. Orman fonksiyonları ise ülkemizde, uluslararası süreçle uyumlu olarak belirlenerek ekonomik, ekolojik ve sosyo-kültürel olarak üç ana başlıkta ele alınır. Orman envanterinin yapılmasında; yetişme ortamı, biyolojik çeşitlilik ve odun dışı orman ürünleri bilgileri dışında envanter bilgileri OGM öngörmesiyle ihtiyaç durumunda içerik ve organizasyon ile yapabileceği envanter çalışmaları ile elde etmektedir. Orman envanteri mevzuat gereği; alan envanteri, yetişme ortamı envanteri, biyolojik çeşitlilik envanteri, ağaç serveti ve artım envanteri, odun dışı orman ürünleri envanteri, ormanın ürün dışı fonksiyonlarının envanteri, sosyo-ekonomik durum envanteri, sağlık durumu envanteri olmak üzere sekiz bölümden oluşmaktadır (Orman Amenajman Yönetmeliği Madde 7,12-13).

Ormanların fonksiyonlarının belirlenmesi, ekosistem sürdürülebilirliği ve çevre sağlığı için kritik öneme sahiptir. Ülkemiz 05.02.2008 tarihli 26778 sayılı Resmî Gazete 'de yayımlanarak yürürlüğe konulan 'Ekosistem Tabanlı Fonksiyonel Orman Amenajman Yönetmeliği' ile ekosistem yaklaşımı, katılımcılığı ve fonksiyonel planlamayı esas almıştır. Bu yönetmelikle, devlet ormanlarının işletme amaçları, ulusal ormancılık programı çerçevesinde, ormanların ekonomik, ekolojik ve sosyokültürel fonksiyonları dikkate alınarak, OGM tarafından belirlenen, katılımcılık ve ekosistem tabanlı fonksiyon planlama yaklaşımıyla orman amenajman planları hazırlanmakta ve uygulanmaktadır. Orman alanları verimli ekosistemler oluşturmaktadırlar ve çeşitli amaçlar için kullanılabilirlikleri bulunmaktadır. Bu nedenle orman alanlarının düzenli periyotlarla izlenmesi verimin ve ekosistemin korunması, kazanç sağlanması bakımından önem arz etmektedir. Ülkemiz orman alanları FRA (Küresel Orman Kaynakları Değerlendirmesi) 2020 raporuna göre Dünya ülkeleri bazında ormanlık alan sıralamasında 236 ülke arasında 27. Sırada, 2010-2020 yılları arasında ormanlık alanda yıllık net kazanç bakımından 6. sırada, 2015, 2020 yılları arasında orman dışı ağaçlandırmada 4. Sırada ve yeniden ağaçlandırma çalışmaları kapsamında 12. sırada yer almıştır (Özgür ve Çevirme, 2021). Ülkemiz ormanlarının coğrafi bölgelerine göre varlığı, %24,4 ile Karadeniz Bölgesi başı çekiyorken %5,8 ile Güneydoğu Anadolu Bölgesi son sırada yer almaktadır. Tablo 3' te Türkiye orman alanlarının asli ağaç türlerine göre dağılımı gösterilmektedir. Türkiye ağaç türleri Tablo 3 dağılımlarına göre incelendiğinde %29,40 ile meşe başı çekerken, %22,85 ile kızılçam ikinci ve %17,54 ile karaçam ağacı üçüncü sırada yer almaktadır (URL- 1).

Tablo 1. Türkiye Orman Alanlarının Asli Ağaç Türlerine Göre Dağılımı

Ağaç Türü Grupları \ Orman Formu (ha)	Normal	Boşluklu Kapalı	Toplam	%Oran
Meşe	2.773.648	4.059.616	6.833.264	29,40
Kızılçam	3.578.387	1.732.467	5.310.854	22,85
Karaçam	2.817.266	1.260.350	4.077.616	17,54
Kayın	1.634.341	269.895	1.904.236	8,19
Ardıç	945.660	509.170	1.454.830	6,26
Sarıçam	445.095	1.106.885	1.551.980	6,68
Göknar	306.673	204.491	511.164	2,20
Sedir	395.304	110.111	505.415	2,17
Ladin	273.988	75.546	349.534	1,50
Fıstıkçamı	152.920	21.676	174.596	0,75
Kızılağaç	99.430	25.321	124.751	0,54
Kestane	64.200	12.752	76.952	0,33
Gürgen	44.503	10.430	54.933	0,24
Sahil çamı	50.093	5.327	55.420	0,24
Kavak	24.559	24.073	48.632	0,21
Fındık	12.236	700	12.936	0,06
Defne	5.719	6.562	12.281	0,05
Dişbudak	10.117	1.957	12.074	0,05
Diğer türler	73.704	99.828	173.532	0,75
TOPLAM	13.707.843	9.537.157	23.245.000	100,00

Tablo 1’de de görüldüğü gibi çeşitli ağaç türlerinin ülkemizin çeşitli orman ekosistemleri içinde bulunduğu görülmektedir.

Her canlı türünde olduğu gibi yabancı ve istilacı türler, ağaç türleri içinde de bulunmaktadır. Orman ekosisteminde çeşitli canlıların yaşadığı ve pek çoğununsa diğer ekosistemler içinde de bulunduğu düzenli göç içinde yer aldığı durumların da dahil olduğu, iyi niyetli bilinçsiz ağaçlandırmalar, tür içi baskınlık faktörlerinin etkili olduğu ve tür savaşlarının olduğu ekosistemler içerisinde baskın tür rolünde belirleyici değişikliğe sebep olarak zayıf kalan türün azalmasına hatta yok olmasına sebebiyet verebilmektedir. İğne yapraklı ağaçlar bulundukları ekosistemlere fayda sağlamasının yanında, endüstriyel ve yaşam alanları için de katkı sunmaktadırlar. Yaşam şartlarına karşı dirençleri ve sağladıkları faydalar ile iğne yapraklı ağaçlar, insan oğlu için kullanışlı bir yapıda bulunmaktadırlar. İğne yapraklı ağaçların son derece dirençli yapıda olabilmeleri, kolay ve hızlı çoğalabilmeleri ve kozalaklanma dönemleri için gereken zamanın kısa oluşu gibi nedenleriyle son derece çabuk şekilde girdikleri yabancı ekosistemde baskın role bürünebilme ve diğer ağaç türlerini tehdit

altına alabilme yeteneğine sahip olmaları çevre kontrolünün uzun periyotlarda olduğu, aksatıldığı ya da yapılmadığı durumlarda ciddi bir istilacı tür problemine neden olabilmektedirler. Bu durum ekosistemin yerli türlerinin yok olma tehlikesiyle kalmamasıyla birlikte, ekosistemin değişimine kadar sürükleyebilmektedir. Egzotik tür veya istilacı tür olarak yeni ekosistemlere tanıtıldığında iğne yapraklı ağaçlar, biyolojik çeşitlilik sağlamamaktadırlar. Bu durum yerli türün baskılanması hatta yok olması sonucuna neden olabilmektedirler. Egzotik türler, ağaç yaşam döngüsünün bir parçası olan su emilimi, toprak kimyası, güneşlenme süreci gibi değişkenlere etki ederek ekosistem dinamiklerinde sarsıcı etkilerde bulunabilmektedirler. İğne yapraklı bazı ağaç türleri yoğun reçine içerikleri nedeniyle kolayca tutuşabilmekte ve yangın riskini büyük oranda artırmaktadırlar. Bu durum yangına karşı hassasiyeti yüksek ekosistemler için felaket işareti olmakta, yok olma tehdidinde bulunmasına sebebiyet vermektedir. İğne yapraklı ağaçların kolay yayılması ve kozalaklı yapıları taşıdıkları hastalık ve zararlılarla beraber hızlı yayılması anlamına da gelmektedir. Bu durumda tanıtıldıkları ortama taşıdıklarıyla beraber gelmelerine ve bulundukları ortama da bu etkiyi yaymalarına sebebiyet vermektedirler. Bunun sonucu orman sağlığını tehdit eden salgınlarla sonuçlanmaktadır (Dash vd., 2019) (Pouliot vd., 2002). Bu durumların önüne geçilebilmesinin temelinde ekosistemin daha çevresindeyken egzotik türlerin tespit edilebilmesinin gerekliliği yer almaktadır (Huebner, 2007). Mahsul ağaçların çiçeklerinin, meyvelerinin ve taç yapılarının metrik ve spektral özellikleri ekosistem dışından gelen yabancı türlerin özellikleriyle karşılaştırıldığında çeşitli sahip oldukları özellikler bakımından ayırt edilebilir olmaktadır. Bu duruma karşın mahsul ağaçları, egzotik türlerin tespitinde ayırt edilebilir hale getirmektedir. Ağaç yaşam süreçleri içerisinde toprak, hava ve su durumlarından kaynaklı bitki stresi sonucunda meydana gelen tepkilerin sonucunda tespitin gerçekleşmesi çoğu zaman süreç içerisinde geç kalınmış nokta olabilmektedir (Chaerle ve Van Der Straeten, 2000). Bu durum mahsul veriminin düşmesine ekonomik ve endüstriyel ihtiyaçlara verilen karşılıklarda geride kalmaya yol açmaktadır (Rock vd., 1986).

Hassas orman envanter yönetimi için bireysel ağaç tespiti son derece önem taşımaktadır. Bireysel ağaç taçlarının saptanması, haritalanması ve tür tespiti orman yaşamının analizi ve envanter yönetimi için gerekliliği zorunlu verilerden olmaktadır. Kapalılık durumu yüksek ormanların örtüşen bir yapıda da bulunmaları sebebiyle taç yapısının tespiti ve ağaç sayısının belirlenmesi oldukça zor bir durum olmaktadır. Kapalılık durumunun yüksek olduğu orman yapılarında; işçilik maliyeti, erişebilirlik, zaman sorunu,

sarf malzemeleri, istihdam problemi, ölçüm aleti yetersizlikleri ve topoğrafyanın zorlayıcılığından ötürü klasik/yersel ölçmeler ile envanter bilgisi edinmek neredeyse imkânsız hale gelmektedir. Buna ek olarak ise orman envanter bilgisi için ölçülecek ağacın kontrol metrikleri saha personelinin manuel biçimde ölçebileceği hassasiyet ile kısıtlı kalacaktır. Bu gibi nedenlerden ötürü orman envanterinin; otomatik, hızlı, düşük maliyet, zamandan tasarruf, karbon depolama kapasitesinin tespiti ve hassas haritalama işlemleri uzaktan algılama sistemleri/yöntemleri ile ancak mümkün olabilmektedir. Orman; meşcere yapısı, hasar tespiti, kereste hacmi değerlendirmesi, ağaç metriklerinin belirlenmesi, amenajman planlarının yüksek korelasyon ve doğruluk düzeylerinde yapılması ancak fotogrametrik ve uzaktan algılama yöntemleri/verileriyle gerçekleştirilebilmektedir (Bahadır, 2023).

Gelişen insansız hava aracı platformlarıyla düşük irtifa uçuşun imkanı hale gelmesi yüksek konumsal hassasiyetli veri toplanabilmesini olanaklı hale getirmektedir. Light Detection and Ranging (LiDAR) sensörler ve gelişmiş kamera sensörlerini taşıyabilen İHA'lar yüksek spektral, konumsal hassasiyetli verilerle çalışılabilmesini olanaklı hale getirmektedir. Lazer tarama (LiDAR), ağaçlarla ilgili yüksek çözünürlüklü yapısal bilgileri çıkarmak için yüksek hassasiyette veri sağlayabilmektedir. LiDAR sistemleri, saha araştırmaları ve hava fotoğrafı analizi gibi geleneksel ağaç türü tespiti yöntemlerine göre maliyetli ve hassas bir alternatiftir (Cetin ve Yastikli, 2022). Gelişmiş ve daha ulaşılabilir hal alan LiDAR sensörleri, ileri düzey analizleri de daha olanaklı hale getirerek bireysel ağaçlar için metrik ağaç yapısını belirlemeyi daha kolay hale getirmektedir. Metrik ağaç analizleriyle makine öğrenmesi ve yapay zekâ eğitimi olanaklı hale gelerek tür tespiti ve ekosistem takibi daha hassas şekilde gerçekleştirilebilmektedir (Asner vd., 2008) (Piiroinen vd., 2018). Radyometrik çözünürlüğü yüksek kameralar, spektral hassasiyeti yüksek sensörlerle birlikte düşük irtifadan üretebileceği konumsal hassasiyeti yüksek veri, çalışma kalitesinde belirleyici faktörlerden olmaktadır. Fotogrametrik yöntemler İHA platformlarına monte edilen yüksek çözünürlüklü kameralarla elde edilen bindirmeli(stereo) görüntülerle nokta bulutu elde etmede kullanılabilmektedir. Yüksek konumsal hassasiyet sağlayan bu yöntem ayrıca spektral çözünürlükten de faydalanılmasını ve ortofoto görüntünün elde edilmesini de sağlamaktadır (Syifa vd., 2020). Gelişen teknolojiyle pahalı LiDAR sensörlerin kullanılması ve bindirmeli görüntüler kullanılarak fotogrametrik yöntemlerle üretilen nokta bulutları, uzaktan algılama yöntemleri kullanılarak ortofoto görüntüler ve kızılötesi görüntüleme tekniklerinin beraber kullanıldığı hibrit yöntemler, mahsul ağaçlar ile

iğne yapraklı ağaçların metrik olarak ayırt edilmesinde, ağaç karakteristiklerinin, sağlıklarının tespit edilmesinde ve ekosistem durumunun takibinde kilit rol oynamaktadır. Hibrit yöntemlerin beraber kullanımı genç mahsul ağaçların, rakip yayılcı türlerden korunabilmesinde ve çevresel sürecin yakın takibinde hızlilik, kolaylık ve süreklilik sağlamaktadır (Bonnet vd., 2017) (Hui vd., 2022) (Leckie vd., 2005). Küresel bir önem kazanan ekosistem sağlığı, araştırmacıları ne sıklıkla ve ne şekilde ağaç sağlıklarının denetlenmesi gerektiğini araştırmaya yönlendirmiştir (Dodet ve Collet, 2012).

Uzaktan algılama (UA) ve bilgi işleme yöntemlerinde meydana gelen gelişmeler, ileri düzey görüntü eşleştirme tekniklerinde büyük gelişmeler sağlamıştır (Cruz-Mota vd., 2012). Son yıllarda da kullanımı artan İHA platformları yüksek çözünürlüklü veri temin edilebilme sürecinde akla gelen ilk çözüm yollarından olmaktadır. Nokta bulutu verisinin; doğrudan temin edilebildiği LiDAR sensörlerle ve fotogrametrik yöntemlerin kullanılarak bindirmeli fotoğraflarla dolaylı yollardan elde edilebilmesi mümkün olmaktadır (Snaveley vd., 2008). İHA platformlarının gelişen teknolojiyle beraber artan faydalı yük taşıma kapasiteleri daha gelişmiş sensörler taşımalarını olanaklı hale getirmektedir. Bu durum büyük miktarda yüksek çözünürlüklü verilerin ulaşılabilirliğini artırmaktadır. Sıralı bir dizi olarak çekilen iki boyutlu (2B) görüntüler fotogrametrik yöntemlerle işlenerek üç boyutlu (3B) nokta bulutları elde edilebilmektedir. Günümüzde fotogrametrik yöntemlerle nokta bulutu üretilmesi için pek çok yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan başlıcaları; yapıdan hareket (Structure from motion – SFM), stereo fotogrametri, çok görüşlü stereo (Multi-view stereo- MVS), yakın mesafe fotogrametrisi (Close-range photogrammetry) olmaktadır (Luhmann vd., 2016) (Schöps vd., 2017), (Selvik, 1989), (Sarıtürk ve Şeker, 2017). Geleneksel İHA tabanlı düşey fotogrametri ile elde edilen fotogrametrik nokta bulutları, ağaç taçları hakkında yükseklik bilgisi barındırmasına karşın ağaç gölgesi, heterojenliği, gölge boyutu, görüntü eşleştirme algoritmalarından kaynaklı oluşan hatalar, bireysel ağaç taç segmentasyonlarında sorunlar meydana getirmektedirler. Fotogrametrik nokta bulutu üretiminde kullanılan algoritmalar, veri toplanması sırasında gerçekleşen doğal olaylar ve alım esnasındaki faaliyetler sırasında meydana gelen hatalar sonucunda, eşleştirme aşamasında eşlenik nokta bulmada başarısız olunmasına sebep olabilmektedir. Bu sebeple yüksek kapalılıktaki ormanlık alanlarda fotogrametrik nokta bulutu verileri fazla gürültü noktası barındırabilmektedir.

İHA platformlarının faydalı yük taşıma kapasitelerindeki gelişim, aktif bir uzaktan algılama teknolojisi olan LiDAR sensörleri, gece-gündüz ölçüm yapabilme yeteneği, yüksek

hassasiyetteki üç boyutlu konum bilgisini hızlı bir şekilde toplayabilme yeteneği ve gölge etkisi, eşleştirme hataları gibi gürültülerden etkilenmemesi özelliği ağaç ve ağaç taç niceliklerinin çıkarılması, metriklerinin belirlenmesi uygulamalarında hassas ve güven düzeyi yüksek veriler sağlamaktadır (Liu vd., 2021). Havadan Lazer Tarama Sistemleri (ALS) ile, lazer sinyalinin çalışma alanı boşluklarından geçerek zemin ve bölge ayrıntılarının ölçümü sağlanabilmektedir. Bouvier vd. (2015), yaptıkları çalışmada Airborne Laser Scanner (ALS) verileri kullanarak odun hacmi, gövde, yer üstü biyokütlesi ve taban alanı tahmini gerçekleştirmişlerdir.

Ormanlık, heterojen alanlarda Yersel Lazer Tarama (TLS) sisteminin kullanımına dair pek çok örnek mevcuttur. TLS (360°) tekli ve çoklu tarama modlarıyla ağaç metriklerinin (gövde, dallar, yapraklar vb.) detaylı bir şekilde kaydedilerek veri toplanabilmesine olanak sağlamaktadır (Moskal ve Zheng, 2012). Orman alanlarının TLS sistemiyle elde edilen nokta bulutları kullanılarak gerçekleştirilen analizinde, 3B sahnedeki orman birincil özelliklerinin (yer, gövde, taç) sınıflandırılması konuları makine öğrenmesi ve derin öğrenme çalışmalarında işlenmektedir (Wielgosz vd., 2023). TLS nokta bulutları çok adımlı tarama gerektirmesi yönüyle zaman alıcı bir işlem olmaktadır, fazla boyuttaki verinin analizi için yüksek donanım özellikleri gerektirmektedir. Taç taban yüksekliği ve taç taban hacmi gibi metriklerin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Harikumar vd., 2022).

Mobil Lazer Tarama (MLS) ormanlarda ulaşılması zor alanlar için erişilebilirliği artırması yönüyle TLS ile veri toplanmasına göre bireysel ağaç metriklerinin çıkarılmasında avantajlar sağlamaktadır. Mobil LiDAR, ölçüm işlemi boyunca saha personelinin konumu ve açısının değişmesi sayesinde gölgelenme sonucunda oluşabilecek gürültü etkilerini ortadan kaldırmasının yanında ağaç merkez konumunun tespitinde daha yüksek hassasiyet sağlamaktadır (Herrero-Huerta vd., 2018). Orman envanteri ve ağaç taç metrikleri hakkında MLS, mobil ölçüm tekniklerinin kullanılmasıyla daha ayrıntılı 3B nokta bulutu verisi elde edilebilmektedir. Tarama sırasında konum alma hataları nedeniyle Mobil Lazer Tarama tekniği ile elde nokta bulutları, Yersel Lazer Tarama tekniği ile elde edilen nokta bulutlarına göre daha fazla gürültü içerebilmektedirler (Bauwens vd., 2016) (Zhong vd., 2017).

Ağaç taç segmentasyonu orman envanter tespitinde, bireysel ağaç metriklerinden olmaktadır. Ağaç taçlarının segmentasyonunda yaygın kullanılan algoritmalarından bazıları; Kanopi Yükseklik Modeli (CHM), MCWS (Marker-Controlled Watershed Segmentation), Lokal Maksimum (LM) ve derin öğrenme tabanlı olmaktadır. Kapalılık yoğunluğu yüksek

olmayan çalışma alanlarında başarılı olan mevcut algoritmalar, kapalılık düzeyinin arttığı çalışma alanlarında ağaç taç segmentasyonunda başarı oranı düşmektedir. Yoğun kapalılıkta, baskın türlerin yarış içinde olduğu, zorlu topoğrafyalar ve dal yapılarının birbirine karıştığı çalışma alanlarında farklı tür ya da farklı bireysel ağaç taçlarının bitişik olarak sonuçlandırılması kaçınılmaz hatalı bir sonuç olacaktır. Çalışma verisinin ormanlık alanlar seçildiği araştırmalarda, orman kapalılık oranı yüksek ise, orman envanteri için gerekli olan ağaç metriklerinden ağaç taçlarının %100 doğrulukta belirlenmesi mümkün değildir (Hao vd., 2022). Lokal maksimum algoritması, hava görüntülerinde en yüksek piksel değeri ve CHM’deki en yüksek değerlere sahip ağaçlar ile işlem gerçekleştirmektedir. LM, tek tip orman meşcerelerinde iğne yapraklı ağaçlarda avantaj sağlayabiliyorken geniş yapraklı ağaçlarda dezavantaj sağladığı görülmektedir (Belcore ve Latella, 2022). İşaretçi Kontrollü Havza Segmentasyonu (MCWS), ağaç tepeleri olarak kabul edilen noktaların ters çevrilerek her ağaç tepesinin etrafının bir su toplama alanı olarak kabul edilmesi prensibine dayanmaktadır. Ağaç tepe olarak kabul edilen noktaların sınırları, su havzasının yüzeyinin su bastığı noktalarda olmaktadır (Yun vd., 2021). Derin öğrenme tabanlı ağaç taç sınırı belirleyebilen algoritmalar; vokselle tabanlı, nokta bulutunu görüntüye dönüştüren ve nokta tabanlı yöntem olarak üç sınıfta incelenebilmektedir (Liu vd., 2021).

Kentsel çevre ve doğal ekosistemlerinde ağaçlar üzerinde strese neden olabilecek birçok etken bulunmaktadır bu etkinin yansımaları ağaç tepesinin durumu gözlemlenerek tespit edilebilmektedir (Morales-Gallegos vd., 2023). Yapılan pek çok çalışmada çeşitli bitki indisleri kullanılarak ağaç sağlığı ile türetilen indisler arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI) çok amaçlı kullanılarak literatürde güven oranı yüksek kabul gören indisler arasında yer almaktadır. Orta Avrupa makro bölgesi olan Slovakya ve Macaristan (Batı Karpatlar ve Panon Havzası)’da yapılan orman izleme çalışmaları MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, NASA tarafından geliştirilen bir radyometre) verileri kullanılarak Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) indisi ile gerçekleştirilmiştir. Orman dinamikleri ile NDVI arasındaki ilişkiyi analiz ettikleri bu çalışmada ilkbahar ve sonbahar mevsimlerindeki fenoloji başlangıçlarını belirlemek, mevsimler arasında orman büyümesi ve sağlık durumunun değerlendirilmesine çalışmışlardır (Barka vd., 2019). Birleşik Arap Emirlikleri’nin (BAE) doğu bölgesinde tatlı su kaynaklarının yetersizliği ve sulamanın ana kaynağı yeraltı suyunun tuzlanması nedeniyle bitki örtüsünün sulanmasında yetersiz kalınmıştır. Bu değişikliğin değerlendirilmesi için, Thematic Mapper (TM, Landsat Programı ile tanıtılan Dünya gözlem uyduları) ve Enhanced

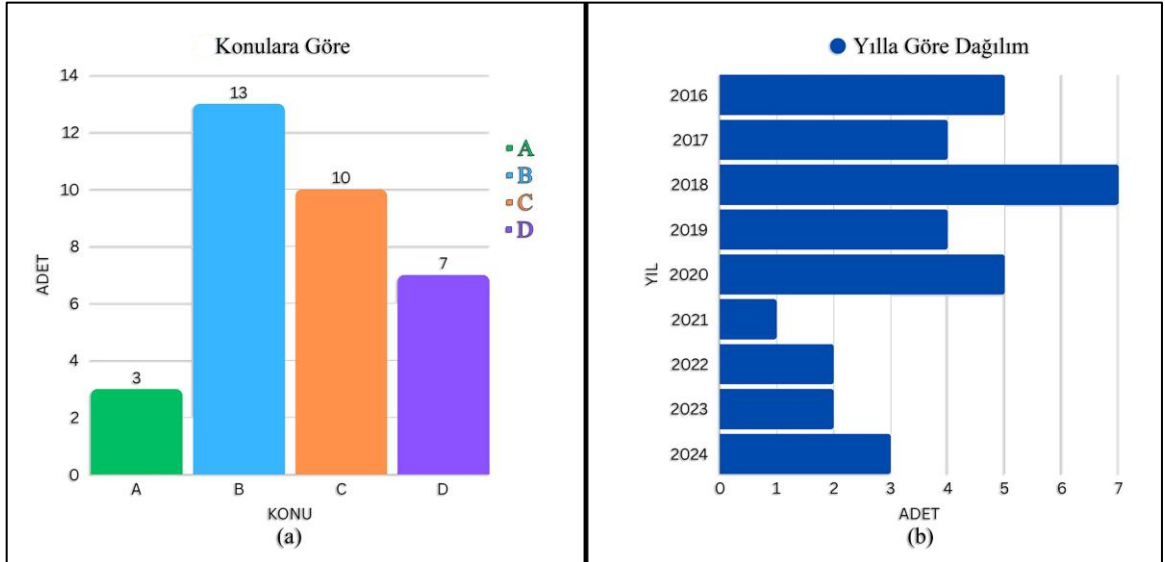
Thematic Mapper Plus (ETM+) verileri kullanılarak Toprak Tabanlı Bitki Örtüsü İndeksi (SAVI) analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma nihayetinde, toprak tuzluluğunun artmasıyla SAVI değerleri düşmüştür sonucunda tuzdan etkilenen alanların tespit edilebilmesini sağlamıştır. Araştırmada bölge hurma ağaçlarının verimli kalabilmesi için toprak tuzluluğu koşullarının ve ilerlemesinin yönetimine, izlenmesine önemli bir dikkat gösterilmesi gerektiği sonucuna varılabilmektedir (Alhammadi ve Glenn, 2008). Erken tespit edilemeyen yüksek bitki stresi, kozalaklı ormanların sağlığını, estetik durumunu ve mahsul durumunu etkileyebilmektedir. Konumsal stres koşullarının takibi ve ilerleyişin önünün kesilmesi, fazla maliyetten kaçınılmasını, ekosistem sağlığını ve sürdürülebilirliğini sağlamaktadır. Uzaktan algılama sistemleri sağladığı spektral ve konumsal bilgiler, sorunun çözülmesinde etkin rol almaktadır. New Mexico'daki bir ardıç ormanında gerçekleştirilen çalışmada, RapidEye uydu takımı kullanılarak Normalize Edilmiş Fark Kırmızı Kenar İndeksi ile bitki stresinin daha erken tespit edilebilme kapasitesi test edilmiştir. 22 zaman sahnesinden oluşturulan seride yoğun stres analizi gerçekleştirilerek orman sağlığı izlenmiştir. NDVI ve GreenNDVI gibi geniş bant spektral indislere göre 16 gün daha erken tespit edebilmişlerdir. Red-Edge bilgisinin orman stres izlemede önemli ölçüde bir iyileştirme etkisine sahip olduğu sonucuna varılarak diğer orman alanlarında daha fazla değerlendirilmesi gerektiği görülmüştür (Eitel vd., 2011).

1.1. Literatür Araştırması

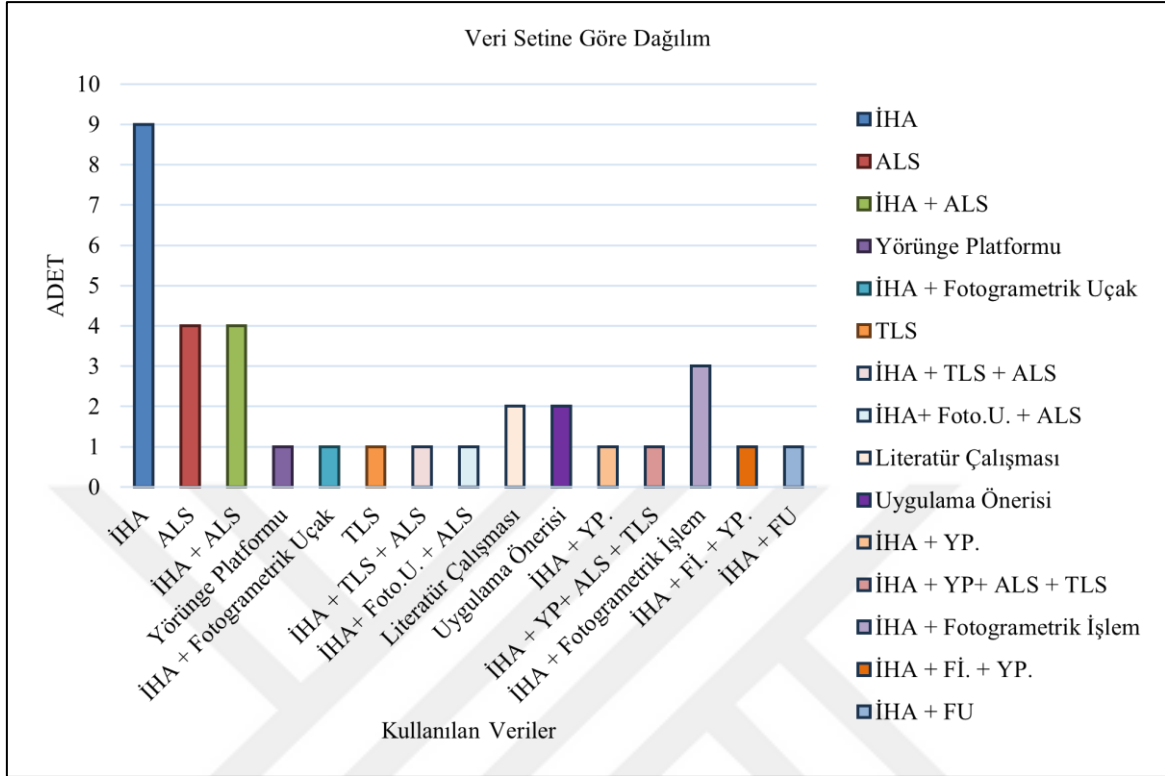
Tez kapsamında ağaç taç segmentasyonu sonucunda, genel ağaç/orman sağlığının belirlenmesi konu başlığı altında, 2016-2024 yılları arasındaki 8 yıl içerisinde yayınlanan 33 adet makale incelenmiştir. Araştırmalar sonucunda 2016-2024 yılları arasında incelenen makale sayılarının dağılımı sırasıyla 5 (2016), 4 (2017), 7 (2018), 4 (2019), 5 (2020), 1 (2021), 2 (2022), 2 (2023), 3 (2024) adet ile sınırlandırılmıştır (Şekil 1'a). İncelenen makalelerde ağaç envanter tespiti ve sağlık durumunun belirlenmesi için veri seti olarak; hava LiDAR (ALS), yersel LiDAR (TLS), fotogrametrik nokta bulutu (FPC), RGB ve multispektral görüntüler, hiper spektral yüksek spektral çözünürlükteki uydu görüntüleri, ortofoto görüntüler kullanılmaktadır. Veri setlerine göre makale sayılarının dağılımı detaylı bir şekilde Şekil 1c'de gösterilmiştir.

Literatür hakkında kolayca bilgi edinilebilmesi için incelenen 33 makale, konularına göre dört (4) ana başlık altında Şekil 1b'de gösterildiği şekilde sınıflandırılmıştır. Gruplandırılan makale konuları şunlardır;

- Egzotik Tür Tespiti (A)
- Spesifik Spektral Niteliklerin Tespiti (B)
- Tür Ayırma (C)
- Zararlıların Tespiti (D)



Şekil 1. a) İncelenen Makalelerin Konularına Göre İstatistikleri b) İncelenen Makalelerin Yıllara Göre İstatistikleri



Şekil 2. İncelenilen Makalelerde Kullanılan Veriler

Klouček vd. (2019), Çek Cumhuriyeti'nin kuzeyindeki UNESCO Biyosfer Rezerv Alanı Krkonoše Dağları Milli Parkı'nın doğu bölgesinde, kabuk böceği zararlıları (*Ips typographus*) tarafından yeşil ama zaten istila edilmiş ağaçların farklı aşamalarının tanınması için İnsansız hava aracı platformu, RGB ve yakın kızılötesi sensörlerini kullanarak, retrospektif bir zaman serisi (Mayıs ayının son haftası- 1 Ekim) oluşturup değerlendirilmesi üstüne çalışmışlardır. Çalışma alanı ağırlıklı olarak Ladin (*Picea Abies*) ormanı, Dağ Muşmulası (*Sorbus Aucuparia*), Adi Kayın (*Fagus Sylvatica*) ve Gümüş Köknar (*Abies Alba*) bulunan olan 10,7 hektarlık bir ormandan oluşmaktadır. Sınıflandırma için Yeşil indeksi (GI), Basit Oran (SR), Yeşil Oranlı Bitki Örtüsü indeksi (GRVI), Normalize Fark Bitki Örtüsü indeksi (NDVI) ve Yeşil Normalize Fark Bitki Örtüsü indeksi (GNDVI) kullanmışlardır. Sağlıklı ağaçların istila edilmiş olanlardan ayırt edilmesinde maksimum olasılık (MLC) sınıflandırma doğruluğunu, bitki örtüsü indeksleri arasındaki farklılıkların gerçek artışı ile ilişkili olduğunu; görüntü alım zamanının tespit doğruluğu üzerindeki etkisinin önemli ölçüde olduğunu tespit etmişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda ilerleyen

periyotlarla doğruluk oranının arttığı bir sınıflandırma sonucu görülmüştür ayrıca gelecek sezonlara dair tahminler yapılarak, istilası muhtemel ağaçların tespitini de gerçekleştirmişlerdir. Genel doğruluk (Overall Accuracy OA) oranı bitki örtüsü indeksleri için periyotlar arasında GI %78-%96, NDVI %70-94, GNDVI %60-%92 olarak hesaplamışlardır.

Senf vd. (2017), zararlı böcek tahribatının, orman ekosistemlerine etkilerinin zamansal mekânsal dağılım dinamiklerinin daha iyi kontrol edilebilmesi ve uygun yöntemlerin önerilmesi için çalışmalarını üç böcek türüne göre ayırdıkları bir literatür inceleme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Kabuk böcekleri, boadleaved defoliators (Türkçe Yazılmalı) ve coniferous defoliators türleri üzerine yapılan çalışmada böcek tahribatının haritalanması için kullanılan sensörlerin ve yöntemlerin üstüne sistematik bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda Uzaktan Algılama yöntemleri kullanılarak böcek tahribatının tespit edilmesinde altı (6) öneride bulunmuşlardır. Öneriler; 1) Böcek tahribatının diğer spektral niteliklerden ayırt edilmesi, 2) Analiz boyutunu konumsal ve zamansal nicel alanlarının genişletilmesi, 3) Yoğun zaman serilerinin kullanılması, 4) Böcek tahribatının gerçek zamanlı izlenmesinin işlevselleştirilmesi, 5) Böcek tahribatlarının insan-doğa sistemleri bağlamında tanımlanması, 6) Böcek tahribatlarının değerlendirilmesi için referans verilerinin geliştirilmesi, olmaktadır.

Moriya vd. (2023), Brezilya São Paulo eyaletinde çalışma alanı için örnekleri iki şeker kamışı ekim bölgesinden seçmişlerdir. İlk bölge 4094 hektarlık bir alan iken ikinci bölge 14,394 hektarlık bir alandan oluşmaktadır. İki çalışma bölgesinden de sağlıklı şeker kamışı yapraklarından 12, şeker kamışı mozaik virüsü ile enfekte yaprak örneklerinden 12 örnek toplayarak laboratuvarda spektrometre incelemeleri ile spektral kütüphanenin oluşturulması ve referans üretilmesi amacıyla hastalıklı ve sağlıklı yapraklar arasındaki dalga boyu farklarını belirlemişlerdir. Belirlenen farklar sonucunda patojenlere daha duyarlı olan dalga boylarını kullanan Antosiyanin kırmızı kenar indeksi (AREI) geliştirilmiştir. İnsansız hava aracı platformuyla elde edilmiş hiper spektral ortomozaikler ile on beş farklı bitki indeksini kullanarak (Simple ratio (SR), NDVI, Normalized Difference Vegetation Index Red Edge (NDVI705), Carotenoid Reflectance Index 1 (CRI1), Photochemical Reflectance Index (PRI), Carotenoid Reflectance Index 2 (CRI2), Plant Senescence Reflectance Index (PSRI), Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index (MCARI), New Vegetation Index (NVI), Transformed Chlorophyll Absorption Reflectance Index (TCARI), Triangular Vegetation Index (TCARI), Anthocyanin Reflectance Index 1 (ARI1),

Anthocyanin Reflectance Index 2 (ARI2), Optimised Soil Adjusted Vegetation Index (OSAVI), Red Edge Position Determination (REP)) yapılan indeks çalışması sonucunda en yüksek genel doğruluğu 0.94 oranıyla AREI ile elde etmişlerdir.

He-Ya vd. (2024), çalışma alanı olarak Çin'in İç Moğolistan'da bulunan 331,641 m² büyüklüğündeki köknar ormanını kullanmışlardır. Bir zararlı türü olan Beyaz çizgili ipek güvesi (*Dendrolimus Superans*)'nin hassas özelliklerinin belirlenebilmesi için varyans analizi (analysis of variance, ANOVA) kullanmışlardır. İnsansız hava aracı platformuyla birlikte multispektral kamera ve LiDAR sistemleriyle ölçümler yapılarak hibrit bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Random Forest (RF) ve Support Vector Machine kullanılan çalışmada LiDAR verileri için OA, RF kullanılarak 0,45, SVM kullanılarak 0,62 bulunuyorken; bitki indeksleriyle SVM kullanılarak OA 0,90, RF kullanılarak 0,77 bulunmaktadır. LiDAR ve bitki indeksleri birlikte kullanılarak elde edilen OA oranları SVM için 0,96, RF için ise 0,76 olarak bulunabilmiştir.

Barnes vd. (2017), *Phytophthora ramorum* tarafından enfekte olan bireysel ağaçların tespit edilebilmesi için çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma verisi Hava destekli lazer tarama (ALS) ile Birleşik Krallık'ın Galler bölgesinin güneyindeki 158 ağaç Ogmöre Ormanından ve 100 ağaç Radnor Ormanından temin etmişlerdir. Ağaç metriklerinin tespit edilmesiyle birlikte dört hastalık şiddet kategorisinde değerlendirme gerçekleştirmişlerdir, 1: hafif, 2: orta, 3: ağır, NI: enfekte olmayan şeklindedir. Ağır enfekte olan bireysel ağaç taçlarında artan parçalanma ve iç taç yüksekliğinde belirsizlikler tespit edilebilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda genel doğruluklar sırasıyla %72 ve %65 oranında bulunmuştur.

Xiang vd., (2024), tarım arazisi rüzgâr kıranlarının dağılımının hızlı ve doğru bir şekilde belirlenebilmesi için insansız hava aracıyla multispektral kamera ve LiDAR kullanmışlardır. Çalışmada rüzgâr kesen türü olarak *Populus bollena* üstüne yoğunlaşmıştır. Çalışma alanı Tiemenguan Şehri 21. Alayının 6. Bölüğü "Xinjiang Üretim ve İnşaat Kolordusu 2. Bölümü Bayingolin Moğol Özerk İli, Xinjiang Uygur Özerk Bölgesi'nde yer almaktadır. Rastgele orman (RF), destek vektör makinesi (SVM), maksimum olasılık sınıflandırması (MLC) ve derin öğrenme U-net modeli, *Anoplophora glabripennis* zararlısı için orman örtüsü kanopi tanıma modeli oluşturmak için kullanmışlardır. İnsansız hava aracı kullanılarak RGB, multispektral görüntüler ve LiDAR tarafından üretilen DSM ile birleştirilerek DSM + RGB + ve DSM + MSI görüntüler elde edilmiştir. Farklı füzyon görüntülerin sınıflandırma genel doğruluğu (Overall Accuracy, OA), DSM + MSI görüntüleri OA = 91,55% > MSI görüntüleri > DSM + RGB görüntüleri >

RGB görüntüleri şeklinde olmaktadır. Sağlıklı ve solmuş kanopilerin tanımlanmasında en yüksek tespit doğruluğu DSM + MSI için sırasıyla %95,91 ve %91,15 oranlarıyla tespit edilebilir iken, RGB görüntülerin sağlıklı ve solmuş kanopiler için en düşük doğruluğu sırasıyla %79,3 ve %78,91 oranlarıyla tespit edilebilmişlerdir.

Syifa vd., (2020), çam solgunluğu hastalığının (pine wilt disease, PWD) tespit edilebilmesi için insansız hava aracıyla Kore Cumhuriyeti Gangwon eyaleti, Chuncheon şehri Anbi ve Wonchang köylerinde insansız hava aracı ve Küresel Konumlama Sistemi (GPS) ile ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Yapay sinir ağı (ANN) ve destek vektör makinesi (SVM) kullanılarak sınıflandırılan bir arazi örtüsü (LC) haritası üretmişlerdir. İnsansız hava aracı ile alınan görüntüler, her çalışma alanı için altı LC sınıfına bölünerek PWD ile enfekte olan ağaçların doğruluk analizini gerçekleştirmişlerdir. Anbi köyü için SVM genel doğruluğu %94,13 olurken ANN doğruluğu %87,43, Wonchang köyü için SVM genel doğruluğu %86,59, ANN doğruluğu %79,33 olarak bulunmuştur.

Alvarez-Taboada vd., (2017), istilacı bitkilerin yerini ve fenotipini belirlemek için yüksek konumsal çözünürlüklü WorldView-2 yörüngesel platform ve İnsansız Hava Aracı platformlarını kullanmışlardır. Hakea Sericea istilacı bitkisi ile kaplanan alanların nesne tabanlı görüntü analiziyle, kullanıcı ve üretici doğrulukları %93 'ten fazla oranda ve insansız hava aracı tabanlı ortofotolar kullanılarak ulaşılan doğruluk %75 'ten fazla oranda bulmuşlardır. Dokusal özelliklerin kullanılması WorldView-2 kullanılarak yapılan genel sınıflandırma için doğruluk sonuçlarını artırsa da Hakea Sericea sınıfı için doğruluğu arttıramamıştır.

Dash vd., (2019), Yeni Zelanda'nın Güney Adası'nda South Canterbury'de Mackenzie Havzasında egzotik istilacı, yerli ekosistemleri tehdit eden türün (*Pinus sylvestris* ve *P. ponderosa*) olgunlaşma ve kozalak üretiminden önce tespit edilebilmesi için insanlı ve insansız hava araçlarıyla multispektral görüntülerin ve lazer tarama verilerinin işlendiği iki makine öğrenme algoritması kullanılarak geliştirilen sınıflandırıcı etkinliğini incelemişlerdir. Üretilen veriler, 1 metre yüksekliğe kadar olan ağaçların tespit edilmesinde yararlı olduğu, çalışma sahasındaki istilacı egzotik türün %99,3'ünden daha kısa olduğunu tespit etmişlerdir. Analiz sonucunda insanlı ve insansız hava araçlarından elde edilen veriler hem lojistik regresyon hem rastgele orman kullanılarak yapılan sınıflandırmaların istilacı egzotik türün tespitini yüksek doğrulukta ($\kappa < 0.996$) gerçekleştirdiğini bulmuşlardır.

Piironen vd., (2018), Kenya Taita tepelerinde 100 km² bir alanda yerli türlerin yerini alan, ekosistem kaynaklarını yoğun şekilde tüketen, *Eucalyptus* spp. ve *Acacia mearnsii*

doğu Afrika’da yaygın egzotik istilacı türlerin haritalanması ve çevresel değişkenlerle ilişkilendirilmesi için havadan görüntüleme ve lazer tarama kullanmışlardır. Önyargılı destek vektör makinesi (BSVM) sınıflandırıcısı kullanılarak parametre/eşik seçim yöntemi, yaygın olarak kullanılan diğer yaklaşımlara göre daha iyi performans gösterdiğini tespit etmişlerdir. *Eucalyptus* spp. için taç seviyesi F1 puanı 0,76, *Acacia mearnsii* için 0,78 olarak bulmuşlardır. *Eucalyptus* spp. ve *Acacia mearnsii* ağaçları sırasıyla çalışma alanının %0,8 ve %1,6 kadarını kapladığını göstermişlerdir.

Perry vd., (2018), Avustralya’nın Tatura bölgesinde (36.44°G 145.27°D; 115 m deniz seviyesinden ortalama yükseklik) kırmızı-allı armut (*Pyrus Communis*) bahçesinde iki sezon boyunca yaprak yansıma ölçümlerini, İHA üzerine monte edilen çok bantlı kamera kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Yaprak azot (N) değerlerine doğrudan yapılan ölçümler yerine yansıma değerleriyle kullanılabilecek indekslerin hesaplanması üzerine çalışmışlardır. Laboratuvarlarda yaprak düzeyinde ölçümler gerçekleştirerek %N için yapılan regresyon analizinde en yüksek R^2 değerini ($R^2 = 0.65$) iki farklı indeks; Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI) ve Normalleştirilmiş Fark Kırmızı-kenar İndeksi (NDRE) 720 nm ile elde etmişlerdir. Buna karşılık gelen RMSE değerleri %0.26 N olarak hesaplamışlardır. Elde edilen bu sonuçlar, yaprak seviyesindeki ölçülen yansıma değerlerinin indeks sonuçları yaprak %N’sini tahmin etmek için kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Sonuçlar M3CI kullanılarak 710 nm’de değerlendirildiğinde bir bahçedeki yaprak azot konsantrasyonuna dair mekânsal bilgi sağlayabildiği gösterilmiştir.

Buendía-Espinoza vd., (2022), Copal reçinesi üretim verimi, ağaçların fizyolojik ve metrik özelliklerine bağlı olması nedeniyle, ağaç verimliliği ve sağlık durumunun belirlenebilmesi için bir yöntem önermiş, metrik özellikler ve ağaç sağlık durumuna dayalı bir reçine üretimini gösteren rastgele orman (RF) modeli geliştirmişlerdir. Çalışma Meksika’nın Puebla eyaletinin Agua Escondida havzasında gerçekleştirilmiştir. Eğitim verileriyle mükemmel uyum seviyesinde model doğruluğu %99, Kappa indeksi %98 olarak bulunmuştur. Doğrulama verileriyle ortalama doğruluk sırasıyla %71 ve %47 olarak bulunmuştur bu iyi bir uyum düzeyi olarak kabul edilmektedir. Ağaçların durumu, Copal ağaçlarında reçine üretimini etkileyen önemli bir faktör olarak tespit edilmiştir. Uygun faktör gövde çapı için 33-38 cm, boy 2-2,5m, ikincil dalların çapı 8-15cm ve 22-32 cm olarak belirlenmiştir.

Qiu vd., (2019), Mangrov toprak üstü biyokütlesinin (AGB) daha yüksek çözünürlükte tahmin edilebilmesi için WorldView-2 görüntüleri, İHA, LiDAR verileri ve saha

araştırmaları kullanılarak yeni bir yöntem önermişlerdir. Çalışmada bireysel ağaç tabanlı çıkarım yönteminin uygulanabilirliği ve göğüs yüksekliğindeki çapın (DBH) segmentasyon doğruluğu üzerindeki etkisi üzerine çalışmışlardır. Bireysel ağaç sınıflandırmada altı Mangrov türünün genel sınıflandırma doğruluğu %86,08 bulmuşlardır. Bireysel ağaç segmentasyonunun ve sayı eşitleme doğrulukları DBH 8-30 cm aralığında sırasıyla %87,43 ve %51,11 bulmuşlardır. Bireysel ağaç tabanlı çıkarım yöntemi 0.49'luk R^2 değeri grid tabanlı RF model yönteminin 0.67 R^2 değerine göre daha düşük doğrulukta hesaplamışlardır. Bireysel ağaç tabanlı çıkarım yöntemi Mangrov toprak üstü biyokütlesinin uzamsal dağılımının daha ayrıntılı şekilde gösterimi için daha hassas olduğunu bu yöntemle ortaya çıkan Mangrov toprak üstü biyokütle haritaları, hassas ve farklılaştırılmış yönlerin tespiti ve yönetimi için daha faydalı bulmuşlardır.

Ye vd., (2020), dünya çapında muz üretim alanlarını tehdit eden Muzlardaki Fusarium solgunluğunun (Panama Hastalığı) tespit ve takip edilebilmesi için İHA tabanlı beş bantlı multispektral görüntüleme yöntemi kullanarak enfekte olan ve olmayan bölgelerin tespit edilebilmesi için yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmada; deney 1'de 120 örneğin %75'i model uyumu için modelleme veri seti olarak geri kalanı doğrulama veri seti (VD1) olarak, deney 2'de 35 örnek model doğrulaması için doğrulama veri seti 2 (VD2) olarak kullanmışlardır. Büyüme değişiklikleri ve spektral analizi ile ilgili sekiz bitki indeksi bitkilerin biyofiziksel ve biyokimyasal özelliklerini belirlemek için seçmişlerdir. Seçilen bitki indeksleri arasında; yeşil klorofil indeksi (CI_{green}), kırmızı kenar klorofil indeksi (CI_{RE}), normalize edilmiş diferansiyel bitki örtüsü indeksi (NDVI), normalize edilmiş diferansiyel kırmızı kenar indeksi (NDRE), arasındaki genel uyum doğrulukları %80'den fazla olmaktadır. Kullanılan indeksler arasında kırmızı kenar klorofil indeksi (CI_{RE}) VD1 (OA= %91,7, Kappa= 0.83) hem de VD2 (OA= %80,0, Kappa= 0.59) için en iyi performansı sergilediğini bulmuşlardır. Bulgular sonucunda kırmızı kenar bandı içeren İHA tabanlı yüksek konumsal çözünürlükteki multispektral görüntülerin muz Fusarium solgunluğu hastalığının tanımlanması için uygun veri çeşidi olduğunu tespit etmişlerdir.

Bergmüller ve Vanderwel (2022), insansız hava araçlarıyla edinilen yüksek çözünürlüklü çok bantlı görüntüler kullanılarak Batı Kanada'da 38 ormanlık alan içindeki üç farklı ağaç türü (*Piceaglauca*, *Pinus contorta*, *Populus tremuloides*) 52.845 ayrı ağaç tepesi görüntülerinde indeksler kullanarak ağaçların sonraki yıllarda ölüm oranlarının tahmin edilmesi üzerine çalışmışlardır. Sonuçlar, spektral bilgilerin rastgele orman modelinde türler arası performansı etkilediğini göstermektedir. Geniş yapraklı türler için

doğruluk daha yüksek bulunmuş, alıcı çalışma karakteristik eğrisinin altındaki alan (AUC) %87,9, dengeli doğruluk (balanced accuracy) ise %85,2 olarak hesaplanmıştır. İki kozalaklı tür için ise dengeli doğruluk sırasıyla %73,3 ve %77,8 olarak tespit edilmiştir. Uzun vadeli izleme, daha büyük dengeli veri kümelerinin, hiperspektral verilerin kullanılması sonuçların iyileştirilmesinde rol oynayabileceğini önermişlerdir. İHA tabanlı elde edilen görüntülerin bireysel ağaçların yıllık ölüm oranlarının tahmininde güçlü bir potansiyele sahip olduğunu göstermişlerdir.

Doughty vd., (2021), Malezya Borneo Sabah Adasındaki Kalabakan Tropikal Yağmur Orman çalışma alanında altı aylık sürede 5 periyot olmak üzere tropikal yağmur ormanı için ağaç ölümlerinin yaprak fizyolojik özelliklerine etkisi incelemişlerdir. Kızıl ötesi ve yakın kızıl ötesi bantlar ile gerçekleştirilen spektral analizler sonucunda ölüm öncesinde potansiyel yaprak karbon dengesinde önemli azalmalar olduğunu bulmuşlardır. Kısmi en küçük kareler regresyon tekniğini kullanarak tropikal ağaçlardaki ölüm oranı orta hassasiyette düşük doğrulukta $r^2=.65$ ve RMSE/ortalama=0.58 tahmin edebilmişlerdir. Bu spektroskopi tekniğinin tropikal ormanlarda uygulanabilmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Näsi vd., (2018)), Finlandiya’da bir şehir olan Lahti’de kentsel ormanlarda bireysel ağaç düzeyinde kabuk böceği istilalarını tespit edebilmek için düşük maliyetli İHA ve Cessna tipi uçak platformlarıyla hiperspektral görüntüleme kullanarak, İHA verileri 10-12cm yer örnekleme mesafesi (GSD) ve 50 cm GSD’ye sahip uçak verilerini karşılaştırmışlardır. Bireysel Norveç Ladinleri (*Picea Abies* L. Karst.), Avrupa Ladin Kabuk Böceği (*Ips Typographus* L.) tarafından, istila edilmemiş, istila edilmiş ya da ölü olarak sınıflandırılmıştır. Daha iyi çözünürlüklü İHA veri seti, %73’lük ($\kappa=0.56$) Cessna tipi uçak ile elde edilen verilerle üretilen sonuçlara kıyasla %81 ($\kappa=0.70$) genel doğrulukla daha iyi sonuçlar sağladığını tespit etmişlerdir.

Dash vd., (2018), orman ağaçlarında (*Pinus radiata* D. Don) herbisit kaynaklı meydana gelen fizyolojik stresin doğru bir şekilde tespit edilebilmesi için, İHA ve uydu tabanlı çok bantlı görüntülerle oluşturulan zaman serilerini kullanmışlardır. Konumsal ve spektral çözünürlükleri farklı olarak elde edilen veriler için sonuçlar fizyolojik test ile ilişkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Farklı spektral indekslerin zaman serisi veri kümeleri arasındaki karşılaştırma; iki sensörün de uyumlu olduğunu, ağaç fizyolojik stresinin izlenmesi için geliştirilen bir yöntem için kullanılabileceğini göstermişlerdir. Daha küçük alanlardaki ayrıntılara karşı daha az hassas olsa da kullanılan uydu verileri, daha geniş alanlardaki, dört

veya daha fazla ağaç, kümelerin fizyolojik stresinin tespit edilebilmesini sağladığını göstermişlerdir.

Lausch vd., (2018), orman ekosistemlerinin işleyişinin kısa ve uzun vadeli olarak izlenebilmesi, modellenmesi ve analizinin gerçekleştirilebilmesi için çok kaynaklı bir orman sağlığı izleme ağı oluşturulmasının gerekliliğini anlatmışlardır. Çok kaynaklı orman sağlığı izleme ağı (MUSO-FH-MN); orman ekosisteminde strese neden olan faktörler, Uzaktan Algılama 'nın orman ekosisteminin modellenmesinde kullanımı, orman yaşamının izlenmesinde kullanılan farklı yöntemler, geleceğe yönelik çok boyutlu şekilde orman sağlık yapısının izlenmesi için verilerin ortak kullanılmasının olduğunu söylemektedirler. Bulunabilirlik, erişebilirlik, birlikte çalışabilirlik ve yeniden kullanılabilirlik ilkeleriyle (FAIR), meta veri yönetimi ve standardizasyon, anlamsal web, güven düzeyi ve belirsizlikler, veri analiz araçları, bilim insanları destekli karar verme mekanizması, paydaşlar için kolay araçlar ve bileşenler ile ortaya koyulabilecek bir sistemin gerekliliğini savunmuşlardır.

Sothe vd., (2019), Güney Brezilya'daki subtropikal orman içerisinde 12 ağaç türünün sınıflandırılması için İHA ile elde edilen hiperspektral görüntüleri kullanarak fotogrametrik nokta bulutunun (PPC) kullanımını araştırmışlardır. Hiperspektral, görünür/yakın kızıl ötesi (VNIR) görüntüler, fotogrametrik nokta bulutu özellikleri, kanopi yükseklik modeli (CHM) verileri ile elde edilen nicelikler destek vektör makinesi (SVM) sınıflandırmasını kullanarak test etmişlerdir. OA değeri %72,4 ve Kappa indeksi %70 ile en iyi sonuç, VNIR bant, PPC özelliklerini, CHM ve VI kombinasyonunu kullanarak elde etmişlerdir.

Lin ve Herold, (2016), Finlandiya'da Helsinki şehrinin güneyinde Seurassari Adası'nda yer alan çalışma alanında dört tipik boreal ağaç türü seçmişlerdir, 9 Norveç Ladini (*Picea abies*, PA), 14 İskoç Çamı (*Pinus sylvestris*, PS), 7 Avrupa Kavağı (*Populus tremula*, PT) ve 10 Saplı Meşe (*Quercus robur*, QR). Statik yersel lazer taraması (TLS) ile üretilen nokta bulutlarından türetilen açık ağaç yapısı (ETS) parametreleri destek vektör makinesi (SVM) sınıflandırıcısı ile test etmişlerdir. Bire bir çapraz doğrulama (LOOCV) yöntemiyle yapılan testler, önerilen TLS tabanlı ETS özellik parametrelerinin sınıflandırma algoritması ile dört ağaç türünü başarıyla sınıflandırabileceğini göstermiştir. Elde edilen doğruluk değerleri, maksimum toplam doğruluk %90 ve sağlam toplam doğruluk %77,5 olarak bulunmuşlardır.

Hui vd., (2023), ağaç mimarisinin üç boyutlu uzayda dağılışının incelenmesi için Almanya'nın Baden-Württemberg eyaleti Bretten ve Karlsruhe yakınlarındaki Orta Avrupa

ormanlarında yaklaşık 1 hektarlık iki orman parselinde İHA tabanlı LiDAR, yersel LiDAR ve İHA ile temin edilen uzaktan algılama verilerini kullanmışlardır (Weiser vd., (2022)). Niceliksel yapısal model (QSM) tabanlı özellik vektörleri ve fraktal geometriye dayalı özellik vektörleri olmak üzere iki yeni tür özellik vektörü geliştirmişlerdir. Geliştirilen özellik vektörlerinin performansını değerlendirmek için beş ağaç türünden 568 bireysel ağaç seçmişlerdir. Test sonucunda *Fagus Sylvatica* ağaç türü en yüksek genel doğrulukta (%98.06) sonuç verirken en düşük doğrulukta *Quercus petraea* (%96,65) sonuç verdiğini tespit etmişlerdir. Geliştirilen fraktal geometriye dayalı özellik vektörleri ve QSM tabanlı özellik vektörleri ağaç türü sınıflandırma performansını etkili bir şekilde iyileştirebileceğini göstermişlerdir.

Ballanti vd., (2016), hiperspektral veriler kullanarak bireysel ağaç türlerinin sınıflandırılmasında, nesne ve piksel tabanlı eğitim örneklerinin ve segmentasyon boyutunun nesne yönelimli sınıflandırma üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Araştırmada SVM ve RF sınıflandırıcılarının karşılaştırılmalı olarak incelenmesi, California Marin County’de Muir Woods Ulusal Anıtı ve Kent Creek Kanyon’unda heterojen bir ormanını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Tüm sınıflandırmalar %90’ın üzerinde genel doğruluklarla sonuçlanmıştır. Ek eğitim örneklerinin kullanılmasıyla SVM, RF’den daha iyi bir performans gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Ferreira vd., (2016), tropik ortamlarda ağaç türlerinin mekânsal dağılımının haritalanması için hiperspektral ve multispektral veriler ile üç denetimli makine öğrenimi sınıflandırıcısı ve VI’lar (bitki indeksleri) 8 türün sınıflandırılması için tropikal mevsimsel yarı-yeşil (Brezilya Atlantik Orman Biyomu) ormanlarda kullanmışlardır. Türler arası bireysel ağaç tepelerindeki spektral değişkenlik ölçüldükten sonra, türlerin ayırt edilmesi için üç farklı denetimli makine öğrenimi sınıflandırıcısı kullanarak, Linear Discriminant Analysis neredeyse tüm test edilen durumlarda Linear ve Radial Basis function (RBF-SVM) Kernel ve Random Forest’ tan daha iyi performans gösterdiğini tespit etmişlerdir. Kısa dalga kıızıl ötesi bantların kullanılmasıyla doğruluk %84’e kadar çıktığı, bitki örtüsü indeksleriyle ve VNIR bant özellikleriyle birleştirildiğinde sınıflandırma doğruluğu %5’e kadar arttığını göstermişlerdir. Diğer bir senaryoda ise ağaç tepeleri ayrılarak her nesne içindeki en yüksek sınıf üyeliği belirlenip etiketlemişlerdir. Bu senaryoda RBF-SVM en iyi tür haritalarını üretmiştir ve hiperspektral veriler ile %84,9 doğrulukla ağaç tepelerini doğru bir şekilde tanımlamışlardır.

Gini vd., (2018), tarafından yapılan çalışmada İtalya Como Cirimido köyünde özel bir fidanlıkta 215x115 m²'lik alanda birkaç ağaç türü üzerinde çalışmışlardır (Akçaağaç (*Acer* spp.), Gürgen (*Carpinus betulus*), Katalpa (*Catalpa* spp.), Kızılcık (*Cornus* spp.), Kayın (*Fagus* spp.), Bakır-Kayın (*Fagus purpurea*), Dişbudak (*Fraxinus* spp.), Ginkgo Biloba (*Ginkgo Biloba*), Bal Akasyası (*Gleditsia Triacanthos*) ve Kestane Yapraklı Meşe (*Quercus Castaneifolia*)). Ağaç türlerinin sınıflandırılması için İnsansız Hava Aracı sistemleriyle elde edilen 0,01 m yer örnekleme aralığına sahip çok bantlı spektral görüntülerle üretilen dijital yüzey modelleri ve ortofotolar ile çalışmışlardır. Çalışma, doku özelliklerinin kullanılmasının orijinal ve türetilen bant kombinasyonları ile sağladıkları genel doğruluklara önemli etki ettiğini araştırmışlardır. Doku özelliklerinin kullanımı bileşenlerin azaltımına bağlı olarak değerler %58'den %78, %87'ye değişerek önemli genel doğrulukta artış sağlamıştır. Sınıflandırma işlemlerinde doku özelliğinin dahil edilmesi çok zamanlı ölçümlerin gerçekleştirilmesindeki zorlukların telafi edilebileceğini önermişlerdir.

Panagiotidis vd., (2017), tarafından yapılan çalışmada Çek Cumhuriyeti Prag şehrinin güneydoğusunda ve güneyindeki iki farklı çalışma alanı üzerinde insansız hava aracı ile algılanan yüksek çözünürlüklü görüntüleriyle ağaç taç çaplarını (Hareketten Yapı) SFM kullanarak hesaplamışlardır. Çalışma alanları (25x25 m) için 2B görüntülerden 3B yapılar oluşturularak, 1. Parselde Avrupa Karaçamı (*Larix Decidua* Mill.), İskoç Çamı (*Pinus Sylvestris* L.) ve Norveç Ladini (*Picea Abies* L.); 2. Parselde Norveç Ladini, İskoç Çamı, Avrupa Karaçamı ve Gümüş Huş Ağacı (*Betula Pendula* Roth.) ile çalışılmıştır. Yüksekliklerin belirlenmesinde Kanopi Yükseklik Modeli (CHM), yerel maksimumların belirlenmesi için raster görüntülerde yumuşatma ve taç çaplarının tahmini için coğrafi bilgi sistemi (CBS) ile Ters Havza Segmentasyonu (IWS) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar yer ölçümleriyle karşılaştırılmasıyla iki yöntemin doğruluğu kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlar taç çapları ve yükseklikler için saha verileri ve uzaktan algılama verileri karşılaştırılmıştır. Kök ortalama kare hatası (RMSE%) yükseklikler için elde edilen değerler 11,42-12,62 aralığında, çap değerleri 14,29-18,56 değerleri arasında hesaplanmıştır. Yöntemler ağaç yükseklikleri ile taç çaplarının tespit edilebilmesi için uygulanabilir olduğunu göstermiştir.

Fassnacht vd., (2016), bir literatür incelemesiyle ağaç türü sınıflandırması için uzaktan algılama tekniklerinde farklı sensör ve algoritmaların etkinliğini araştırmışlardır. Geniş coğrafi alanlar üzerinde yapılan ağaç türü sınıflandırmaları örneklerinin az olduğunu ve mevcut yaklaşımların geniş coğrafyalarda ağaç türü envanteri tespitinde büyük zorluklarla

karşılaştığını tespit etmişlerdir. Çalışma sonucunda ağaç türü sınıflandırma yaklaşımlarının belirli koşullar altında çalışma sebepleri ve çalışmama sebepleriyle ilişkili daha fazla odaklanması gerektiğini önermişlerdir.

Wu vd., (2024), tarafından Çin'in doğusunda Shandong Eyaleti Jinan şehrinde Shandong Normal Üniversitesi Qianfoshan Kampüsü ve çevresinde insansız hava aracı tabanlı yüksek çözünürlüklü RGB görüntüler, LiDAR verileri, RGB spektral nitelikler, doku özellikleri, bitki örtüsü indeksleri, HSV spektral özellikleri, HSV doku özellikleri, yükseklik ve yoğunluk özellikleri dahil olmak üzere 10 baskın ağaç türü üzerinde rastgele orman sınıflandırıcısı (RF) ile sınıflandırmak için farklı özellik kombinasyonları içeren yedi farklı çalışma yürütülmüştür. Optimal özellik kombinasyonunun genel doğruluğu ve Kappa katsayısı, Rastgele Orman sınıflandırışıyla sırasıyla %73, %74 ve 0.70'e ulaşabilmiştir. Çalışma sonuçları, kentsel ağaç türlerinin sınıflandırılması için RGB görüntüler ve LiDAR verilerinin etkinliğini doğrulamıştır.

Varin vd., (2020), 11 ağaç türünün ağaç düzeyinde haritalayabilmek için Kanada Quebec eyaletinin güneybatısında yer alan 250 km²'den büyük Kenauk Nature bahçesinde çalışma gerçekleştirmişlerdir. WorldView-3'ten türetilen 240 değişken, piksel tabanlı aritmetik özellik hesaplama teknikleri ile elde edilmiştir. Beş farklı modelleme tekniği; destek vektör makineleri, regresyon ağaçları, rastgele orman, k-nearest neighbors ve linear discriminant analizi karşılaştırmışlardır. Sonuçlar incelendiğinde RF tekniği daha yüksek doğruluk sağladığını göstermişlerdir.

Park, (2020), çalışmasında Güney Kore Yangpyeong Obin-ri ve Kore Üniversitesi Yangpyeong Deneysel Ormanı'nda (toplam 90 parsel) baskın türlerin (Pinus densiflora, Larix kaempferi ve Quercus spp.) ayrımını yapmak ve parsel ölçeğinde hacim tahmini için lazer tabanlı uzaklık algılama (LiDAR) yükseklik, yoğunluk ve oran parametrelerinin uygulanabilirliği üzerine çalışmıştır. Daha ileri incelemelerinde parsel içindeki LiDAR yoğunluğunun dağılımı ve ortalamasının, üç türü ayırt etmede önemli sınıflayıcılar olduğunu göstermiştir. Türle özgü optimal parsel hacim modelleri, sırasıyla 0,71, 0,74 ve 0,56 olarak katsayıları belirlemiştir. Her modelleme uygulaması için değişkenlerin birçoğu, yüzey örtüsünün dikey ve yatay özellikleriyle ilişkilendirilmiş, tür sınıflandırması ile parsel hacim tahmini yaklaşımlarının her ikisinde de türle özgü özelliklerin temsil edilebilmesi için yeterli olduğunu bulmuştur. Her iki uygulama için gözlemlenen farklı değişken kombinasyonları, farklı çalışmalar için uygun değişken kombinasyonlarının gerekliliğini göstermiştir.

Liu vd., (2021), LayerNet adı verilen nokta tabanlı derin sinir ağı önermişlerdir. Veri seti olarak Çin'in Hebei Eyaleti, Chengde Şehri'ndeki Moğolistan Özerk Bölgesi'nde bulunan Saihanba Milli Orman Parkı'nda 1790 beyaz huş ve ardıç ağacı olarak iki tür bulunan veri seti kullanmışlardır. Orman bölgelerinde LiDAR verileri için Öklidyen uzayında birden fazla örtüşen katman bölünerek, ağacın yerel 3D yapısal özelliklerinin elde edilmesidir. Tüm katmanların özellikleri birleştirilir ve küresel özellik, konvolüsyon ile elde edilerek ağaç türlerinin sınıflandırılması için kullanılmaktadır. LayerNet'in 3D verileri doğrudan kullanarak ağaç türlerini doğru bir şekilde sınıflandırabildiği ve en yüksek sınıflandırma doğruluğu olarak %92,5'e ulaşabildiği görülmüştür.

Chi vd., (2020), tarafından Belçika Brüksel kentinin doğu kısmında gerçekleştirilen çalışmada, kentsel düzeyde ağaç sağlığı, sahada değerlendirilen bir dizi ağaç sağlığı göstergesi (yaprak dökümü, renk değişimi ve bunların kombinasyonu) ile temsil edilmiş ve bu göstergeler, Random Forest sınıflandırıcısı kullanılarak hava kaynaklı lazer tarama (ALS) ve hiperspektral görüntüler (HSI) kullanarak sınıflandırmışlardır. ALS ve HSI indekslerinin birlikte kullanılması, en yüksek doğruluğu sağladığını tespit etmişlerdir, genel doğruluk ise 0,81 ile 0,89 arasında değişmiştir. Bu çalışma, gelecekte kentsel ağaç sağlığının izlenmesi için bir temel oluşturmakta ve yöneticilere erken müdahale yönetimini yönlendirme imkânı sunduğunu önermişlerdir.

Abdollahnejad ve Panagiotidis, (2020), tarafından yapılan çalışmada Çekya Prag şehrinin güneydoğusunda Kostelec Eğitim Ormanı İşletmesi sınırları içinde bulunan Oplany Köyü yakınlarında 180x160 m büyüklüğünde Norveç ladini (*Picea abies* L.) ve sarıçamın (*Pinus sylvestris* L.), tüm ağaçların %70'ini, kalan %30'unu tüylü meşe (*Quercus pubescens* Willd.), gürgen (*Carpinus betulus* L.) ve gümüş huş (*Betula pendula* Roth.) türlerinin oluşturduğu ormanlık alanı çalışma alanı olarak seçmişlerdir. Çift zamanlı, 5 bantlı hava görüntülerini kullanarak ağaç türü sınıflandırması ve kabuk böceği istilasının neden olduğu sağlıklı, sağlıklı ve ölü ağaçlarının tespit edilmesini kolaylaştıran bir yeni iş akışı önermişlerdir. 2019 yılının ilkbahar ve yaz ayları arasında toplanan hava görüntülerinden, fotogrametrik işleme yöntemiyle sayısal arazi modellerini (DTM), sayısal yüzey modellerini (DSM) ve 0.05m çözünürlüklü ortofotoları, taç yüzeyinin spektral analizi ve doku analizi (TA) için giriş verileri olarak kullanmışlardır. Toplamda dokuz bitki örtüsü indeksi (VI) ve 13 TA kullanılan yöntemde, ağaç türü ve sağlık durumunun detaylı sınıflandırılması için destek vektör makinesi (SVM) algoritması kullanılarak ağaç sınıflandırmasında genel

doğruluk %81,18, sağlık durumu değerlendirmesinde genel doğruluk %84,71 olarak elde etmişlerdir.

1.2. Temel Kavramlar

1.2.1. Fotogrametri

Fotogrametri, nesnelerin radyometrik ve geometrik özelliklerini fotoğraflar yardımıyla tespit edilerek yorumlanması olarak tanımlanmaktadır. Uluslararası Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Derneği (ISPRS) fotogrametriyi, nesnelerin ve çevresinin fiziksel temasa gerek kalmadan, yayılan elektromanyetik enerjinin algılanması, işlenmesi ve yorumlanması yoluyla doğru ve güvenilir bilgiler elde edilmesi olarak tanımlamaktadır.

Fotogrametri; nesnelerin, yüzeylerin ve alanların ölçülmesi ve haritalandırılmasını, uzaktan, fotoğraflar veya diğer görüntüleme teknikleriyle elde edilen verilerle gerçekleştiren bilim ve teknoloji dalıdır. Bu yöntem, fotogrametrik analizlerde nesnelerin üç boyutlu yapılarının çıkarılmasında temel bir teknik olarak kullanılmaktadır. Fotogrametride hava fotoğrafı alımı bindirmeli çekilmiş fotoğraflara dayanmaktadır.

Arazinin topografik yapısı, arazi kullanımı ve diğer coğrafi özelliklerin hassas bir şekilde belirlenmesi için, hava veya uydu fotoğraflarından, lazer tarayıcılar ve insansız hava araçları gibi modern teknolojilerden elde edilen veriler fotogrametrik yöntemlerle işlenmektedir. Bu yöntemde, kamera pozisyonu, odak uzaklığı ve diğer parametreler analiz edilerek gerçek dünya nesnelerinin boyutları ve konumları yüksek hassasiyetle hesaplanmaktadır. Gelişmiş yazılımlarla bütünleşmiş çalışan modern fotogrametrik yöntemler hem hava hem de yer tabanlı sistemlerle uygulanabilir çalışması daha kapsamlı veri toplanması ve analiz yapılmasına imkân sunmaktadır (Nex ve Remondino, 2014).

Fotogrametri, kamera konumu ve uygulama alanına göre üç ana kategoriye ayrılmaktadır: hava fotogrametrisi, yersel fotogrametri ve yakın mesafe fotogrametrisi. Hava fotogrametrisi, genellikle uçaklar veya insansız hava araçları (İHA) gibi yüksek irtifa platformları aracılığıyla gerçekleştirilen bir yöntem olup, geniş alanların haritalandırılması ve topografik analizlerin yapılmasında etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Yersel fotogrametri, yer seviyesinden gerçekleştirilen görüntüleme işlemleriyle, nesnelerin çevresindeki detaylı ölçüme ve üç boyutlu modelleme işlemlerinin yapılmasına imkân tanır (Siebert ve Teizer, 2014).

1.2.2. İnsansız Hava Araçları Tabanlı Fotogrametri

Uzaktan gözlem için pek çok farklı platform kullanılmıştır, bunlardan en eski platform balonlardır. 1858 yılında Tournachon tarafından Paris'in havadan fotoğrafları sıcak hava balonlarıyla çekilmeye başlanmıştır. 1882 yılında İngiliz meteorolog E.D. Archibald'ın kullandığı uçurtmalar, 1897 yılında İsveçli bilim insanı Alfred Nobel'in kullandığı roketler, 1903 yılında Bavyera Güvercin Birliği üyesi Neubronner tarafından öne sürülen, güvercinlerin kullanılmasıyla gerçekleştirilen havadan fotoğraflama, havadan fotoğrafçılık için gerçekleştirilen deneylerdendir. Gelişen kamera ve radyo kontrol sistemleriyle diğer platformlar ile yapılan çalışmalar hızla büyümüştür. Navigasyon ve kamera sistemleri, düşük irtifada yüksek çözünürlüklü haritalamalar için radyo kontrollü platformlara entegre edilmiştir (Colomina ve Molina, 2014). Przybilla ve Wester-Ebbinghaus 1979, 3m uzunluğunda, radyo kontrollü sabit kanatlı bir insansız hava aracı sistemleri (UAS) ve optik kamera ile görüntüleme gerçekleştirmişlerdir.

Son kullanıcı ihtiyaçlarının farkında olan vizyoner teknoloji ve hizmet şirketleri ile insansız hava araçlarının sosyal ve ticari faydalarını öngören açık fikirli sivil havacılık otoriteleri, kısa sürede bu teknolojiyi geliştirmeye, uygulamaya ve düzenlemeye başlamıştır. Uzaktan algılamada, uydu görüntüleme sistemlerinin sınırlamalarının aşılmasında insansız hava araçları gibi alçak irtifa platformları geliştirilmiştir. İnsansız hava araçları, çeşitli hava platformlarına kıyasla daha düşük maliyetli, direkt müdahale gerektirmeyen çözümler sunmaktadır (Petrie, 2013). Faydalı yük kapasiteleri, taşıdıkları sensör kabiliyetiyle zorlu topografik yapıların düşük irtifadan haritalanması, anlık görüntü işleme gibi haritacılık faaliyetlerinde gelişen teknolojiyle kullanılan önemli uzaktan algılama platformlarından olmaktadır.

Fotogrametrinin temel matematiksel modeli, izdüşüm (kolinearite) denklemleri üzerine inşa edilmiştir ve bu model, cisim uzayındaki noktaları temsil eden ışınların izdüşüm merkezinden geçerek resim düzlemine izdüşürülmesi esasına dayanır. Bu süreç, iki boyutlu fotoğraf koordinatları ile üç boyutlu obje koordinatlarının hesaplanmasını sağlar. Fotogrametrinin temel matematiksel modeli Şekil 3'te ayrıntılı bir şekilde gösterilmektedir. Konumlandırma işlemi için iç yöneltme (asal uzaklık (c), asal nokta koordinatları (x_0, y_0)) ve dış yöneltme parametrelerine (dönüklük açıları (ω, ϕ, χ) ile izdüşüm merkezi koordinatları (X_0, Y_0, Z_0)) ihtiyaç duyulur. Dış yöneltme parametreleri, fotoğraf çekimi esnasında uçağın hareketlenmesi sonucu oluşan dönüklük açıları ve izdüşüm merkezi konumlarıyla belirlenir.

modellenmekte olup, bu dönüşümün doğru bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için ölçek faktörü (λ_i) ve dönüklük matrisi (R) gibi parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Noktalar arasındaki bu bağlantılar, üç boyutlu vektörler aracılığıyla ifade edilmekte olup ve dönüşümün hassasiyeti bu parametrelerin doğruluğuna bağlı olmaktadır. Genel izdüşüm formülü Denklem 1’de ifade edilmiştir.

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + \lambda_i' R \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ -c \end{pmatrix} \quad (1)$$

Obje koordinat sistemi ile görüntü koordinat sistemi, birim vektörler (i, j, k ve k, m, l) aracılığıyla ortogonal bir yapıya sahiptir ve her iki sistemde de tüm eksenlerde aynı ölçek faktörü kullanılmaktadır. Arazi koordinatlarından (X_i, Y_i, Z_i) görüntü koordinatlarının (x_i, y_i) hesaplanmasında kullanılan izdüşüm denklemi, bu ilişkiler göz önünde bulundurularak formüle edilmektedir. Hesaplamaların kolaylaştırılması amacıyla, kamera sabiti (c) negatif işaretle ifade edilmekte ve matris dönüşümleri sırasında dönüklük matrisinin (R) tersine (R^{-1}) ihtiyaç duyulmamaktadır. Bunun yerine, dönüklük matrisinin transpozesi (R^T) dönüşüm işlemleri gerçekleştirmek için yeterli olmaktadır. Bu yapı, obje ve görüntü koordinat sistemleri arasındaki geometrik ilişkinin hassas ve etkili bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır. Arazi koordinatları (X_i, Y_i, Z_i) ile resim koordinatları (x_i, y_i) arasındaki dönüşümün hesaplanmasında kullanılan izdüşüm denkleminin yeni formu, Denklem 2’de ifade edilmiştir.

$$\begin{pmatrix} X_i \\ y_i \\ -c \end{pmatrix} = \frac{1}{\lambda_i} R^T \begin{pmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Dönüklük matrisinin (R) hesaplanabilmesi için üç eksenlerdeki dönüklük matrislerinin (R_ω, R_ϕ, R_χ) bilinmesi gerekmektedir. Bu matrislerin hesaplanmasında, ilgili dönüklük açılarına ait kosinüs ve sinüs değerleri belirlenir. X, Y ve Z eksenlerindeki dönüklük matrisleri sırasıyla (3), (4), (5) numaralı eşitliklerde ifade edilmiştir. Bu matrisler kullanılarak (6) numaralı denklemde genel dönüklük matrisi formülüne ulaşılır. Ayrıca, dönüklük matrisi (R) için birden fazla tanım yapılabilir ve bu, eksenler arasındaki açıların kosinüs ve sinüs değerlerinin hesaplanmasıyla mümkündür. Her bir dönüklük açısı için ayrı ayrı hesaplanan dönüklük matrislerinin çarpımı, nihai dönüklük matrisinin (R) elde edilmesini sağlar.

$$R_{\omega}^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$R_{\varphi}^T = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$R_{\chi}^T = \begin{pmatrix} \cos \chi & \sin \chi & 0 \\ -\sin \chi & \cos \chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$R^T = R_{\omega}^T R_{\varphi}^T R_{\chi}^T = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (6)$$

(2) numaralı denklemde R^T matrisinin yerine konulması, resim koordinatlarının (x_i , y_i) hesaplanmasına yönelik izdüşüm denklemleri (7) ve (8) numaralı eşitliklerle ifade edilmektedir. Bu aşamada, ölçek faktörü (λ), sadeleştirme işlemi sonucu denklemlerden çıkarılmaktadır. İzdüşüm denklemlerinin yapısı, görüntü düzlemi, izdüşüm merkezi ve arazi noktalarının doğrusal bir hat üzerinde yer alması ilkesine dayanır. Bu ilke, arazi ve görüntü koordinatları arasındaki doğrusal ilişkiyi tanımlayarak, matematiksel modelleme sürecine olanak tanır (Bahadır, 2023).

$$x_i = -c \frac{r_{11}(X_i - X_0) + r_{12}(Y_i - Y_0) + r_{13}(Z_i - Z_0)}{r_{31}(X_i - X_0) + r_{32}(Y_i - Y_0) + r_{33}(Z_i - Z_0)} \quad (7)$$

$$y_i = -c \frac{r_{21}(X_i - X_0) + r_{22}(Y_i - Y_0) + r_{23}(Z_i - Z_0)}{r_{31}(X_i - X_0) + r_{32}(Y_i - Y_0) + r_{33}(Z_i - Z_0)} \quad (8)$$

1.2.3. Multispektral Görüntü

Görsel temsiller, bir nesnenin, ortamın veya olayın optik, elektronik veya diğer fiziksel yöntemlerle yakalanan görüntü ve fotoğraflar aracılığıyla sunulmasıdır. Görüntüler, iletişim, analiz ve görselleştirme gibi birçok amaçla yaygın olarak kullanılmaktadır. Görüntüler, bir yüzeyden ışığın yansımaları veya yayılması sonucu oluşmaktadır ve çıplak gözle algılanabilir

ya da sensörler tarafından tespit edilebilmektedirler. Işığın dijital sensörlerle etkileşimi sonucunda elde edilen spektral nicelikler, kalıcı ve dijital bir temsil oluşturarak görüntü formatında sunulmaktadır.

Dijital görüntüler, her biri renk veya ışık yoğunluğu bilgisi taşıyan piksellerden oluşmaktadır ve kameralar, uydu sensörleri gibi optik cihazlarla elde edilebilmektedirler. Bu görseller, karmaşık bilgilerin kolayca anlaşılabilir bir şekilde iletilmesini sağlarken aynı zamanda gerçeklik ile dijital platformlar arasında bir köprü oluşturmaktadırlar. Dijital görüntüler, uzaktan algılama, bilgisayarlı görme ve yapay zekâ gibi modern uygulamaları mümkün kılmakta, doğal ve inşa edilmiş çevrelerdeki desenlerin, olayların ve olguların incelenmesini kolaylaştırmaktadırlar. Çok yönlülükleri sayesinde, bu görseller araştırma, eğitim ve teknoloji geliştirme süreçlerinde kritik bir değer taşımaktadırlar.

Multispektral görüntüler, bir nesneden yansıyan ışığın çeşitli dalga boylarında algılanarak, çok bantlı sensörlere sahip ileri düzeyde görüntüleme sistemleri tarafından işlenmesiyle oluşturulan veri setleridir. Bu tür görüntüler genellikle görünür bölge, yakın kızılötesi ve kızılötesi spektral bölgelerden elde edilen bilgileri içermektedir. Bu görüntüler, farklı spektral bantlarda kaydedilen sensör verilerinin bir araya getirilmesiyle nesnelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımaktadır.

Multispektral görüntüler, bitki örtüsü, su yüzeyleri ve arazi kullanımı gibi doğal ve insan kaynaklı unsurların analizinde kritik bir rol oynamaktadırlar. Bu görüntüler, çevresel izleme, tarımsal uygulamalar ve kentsel planlama gibi çeşitli uzaktan algılama alanlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ek olarak, multispektral veriler, zaman içerisinde meydana gelen değişimlerin görselleştirilmesini ve bu değişimlerin farklı disiplinler kapsamında detaylı analizini mümkün kılmaktadırlar. Farklı dalga boylarındaki ışık yansımalarının hassas bir şekilde ayrıştırılması, yüzeylerin kimyasal özelliklerinin detaylı bir şekilde analiz edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu durum, çok bantlı indeks analizlerinin etkin bir şekilde kullanılmasına zemin hazırlamaktadır. Yüksek spektral çözünürlük ve bant ayrımı, özellikle bitki sağlığı analizi ile arazi kullanımının izlenmesi gibi alanlarda temel bir gereksinim olarak öne çıkmaktadır (Yel ve Tunc Gormus, 2023).

1.2.4. Üç Boyutlu Nokta Bulutu

Nokta bulutları, Dünya üzerindeki doğal veya insan yapımı nesnelerin dış yüzeylerini, üç boyutlu (X, Y, Z) koordinat bilgileriyle temsil eden veri kümeleridir. Coğrafi

uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bu veri setleri, yüzeylerin detaylı analizini mümkün kılarak haritalama, modelleme ve coğrafi analizlerde büyük avantajlar sağlamaktadırlar. Özellikle Dijital Yükseklik Modelleri oluşturma, kentsel özelliklerin (binalar, köprüler, yollar, ağaçlar gibi) modellenmesi, harita detaylarının çıkarılması, hacim hesaplamaları ve etkili hasar değerlendirmeleri gibi bir dizi haritalama görevinde önemli bir rol oynamaktadırlar. Nokta bulutları genellikle LiDAR (Lazer Algılama ve Mesafe Ölçümü) sistemleri veya fotogrametrik yöntemler kullanılarak elde edilmektedir ve kentsel alanlar, arazi şekilleri ve doğal yapılar gibi unsurların yüksek doğrulukla haritalanmasında kullanılmaktadır.

LiDAR (Işık Algılama ve Mesafe Belirleme) teknolojisi, lazer ışığı kullanarak yüzeylere olan mesafeleri ölçen ve bu ölçümleri üç boyutlu (X, Y, Z) modeller oluşturmak için kullanan bir uzaktan algılama yöntemidir. Bu teknoloji, yüzeylerin topografyasını, yapısal özelliklerini ve çevresel faktörleri yüksek hassasiyette haritalamayı mümkün hale getirmektedir. Haritacılıkta, LiDAR verileri, özellikle ağaç çıkarımı ve orman yapılarının analizi için önemli bir rol oynamaktadır. LiDAR teknolojisi, ağaçların yükseklikleri, yoğunlukları ve dağılımları gibi bilgilerin doğru bir şekilde elde edilmesini sağlamaktadır. Arazi şekillerinin ve bitki örtüsünün daha detaylı metrik analiz edilmesine olanak tanımaktadır. LiDAR, geniş alanlarda, özellikle ulaşılması zor bölgelerde hızlı ve doğru veri toplama kapasitesiyle, ağaç çıkarımı ve orman yönetimi gibi uygulamalarda haritalama süreçlerini önemli ölçüde kolaylaştırmaktadır.

LiDAR teknolojisi ile farklı yoğunluk ve çözünürlük seviyelerinde nokta bulutları üretmek için hava (ALS), yersel (TLS) ve mobil LiDAR (MLS) gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Hava LiDAR nokta bulutları, İHA'lar, uçaklar gibi hava platformlarına monte edilen LiDAR sensörleriyle toplanır. İHA'lar ile yapılan ölçümler, genellikle düşük veya orta irtifada gerçekleştirildiği için, uçakla yapılan ölçümlere kıyasla daha yoğun nokta bulutları üretir, çünkü bu araçlar yere daha yakın olarak ölçüm gerçekleştirmektedirler. Hava LiDAR sistemleri geniş alanları hızlı bir şekilde taramak için etkili bir yöntemdir lakin yoğun yerleşim alanlarında veya ormanlık bölgelerde ağaçların veya yapıların alt kısımlarına dair detayları yakalamada eksik kalabilmektedir. Bu eksiklik, arazi karmaşıklığı ve tarama açısı gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir (Baltsavias, 1999).

Fotogrametrik nokta bulutları, yüzeylerin üç boyutlu temsillerini oluşturmak için kullanılan görüntüleme tekniklerinden çeşitli fotogrametrik matematiksel modeller ile türetilen verilerdir. Nokta bulutlarının oluşturulması genellikle, yer tabanlı veya hava

platformlarından elde edilen en az iki görüntünün stereo değerlendirilmesi ile mümkün olmaktadır. Fotogrametrik ölçüm yöntemlerinin temel veri kaynağı, uçaklar veya insansız hava araçları ile elde edilen bindirilmiş hava fotoğraflarıdır. Bu fotoğraflar, belirli bir bölgedeki yüzeylerin konum ve yüksekliğini hassas bir şekilde belirlemek için fotogrametrik yöntemlerle görüntü eşleştirme yapılmaktadır.

Fotogrametrik nokta bulutları, sınırlı coğrafi alanlarda derinlemesine analizler yapabilmek için önemli bir veri kaynağı olmaktadır. Bu veri türü, arazi modelleme, inşaat projeleri için üç boyutlu modelleme ve çevresel değerlendirmeler gibi çeşitli coğrafi ve harita uygulamalarında geniş bir şekilde kullanılmaktadır (Remondino ve El-Hâkim, 2006).

1.2.5. İlgi Alanı (Region Of Interest ROI)

"Region of Interest" (ROI) kavramı, haritacılık ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) gibi birçok alanda belirli bir bölgede ilgilenilen detayın hassas bir şekilde incelenmesi amacıyla kullanılan önemli bir analiz aracıdır. ROI, genellikle daha geniş bir alandan seçilen, araştırma veya analiz için kritik öneme sahip olan bir alt örneklem bölgesini ifade etmektedir. Coğrafi analizlerde, bu bölge çevresel değişiklikler, arazi kullanımı, doğal afetler veya kentsel gelişim gibi farklı konulara odaklanmak amacıyla belirlenebilmektedir. Özellikle uzaktan algılama verileri, hava fotoğrafları, LiDAR ve uydu görüntüleri gibi teknolojiler kullanılarak ROI alanları belirlenebilmektedir. ROI' nin amacı, analizlerin daha hassas bir şekilde yapılabilmesi için büyük çalışma alanlarında istenilen detaylara odaklanmış incelemeler yapılmasına imkân vermektir. Örneğin, ağaç tespiti uygulamalarında ROI, bireysel ağaç taçlarının sınırlarının belirlenmesi ve bu bölgelerin spektral, yapısal veya metrik özelliklerinin analizinde kullanılabilmektedir. Bu yöntem, orman yapısının modellenmesi, biyokütle tahmini ve ekosistem hizmetlerinin değerlendirilmesi gibi çeşitli uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır. Bu şekilde, ROI kavramı hem çevresel analizlerde hem de farklı teknik alanlarda hedef odaklı veri analizi ve hassas modelleme için kritik bir rol üstlenmektedir (URL-2).

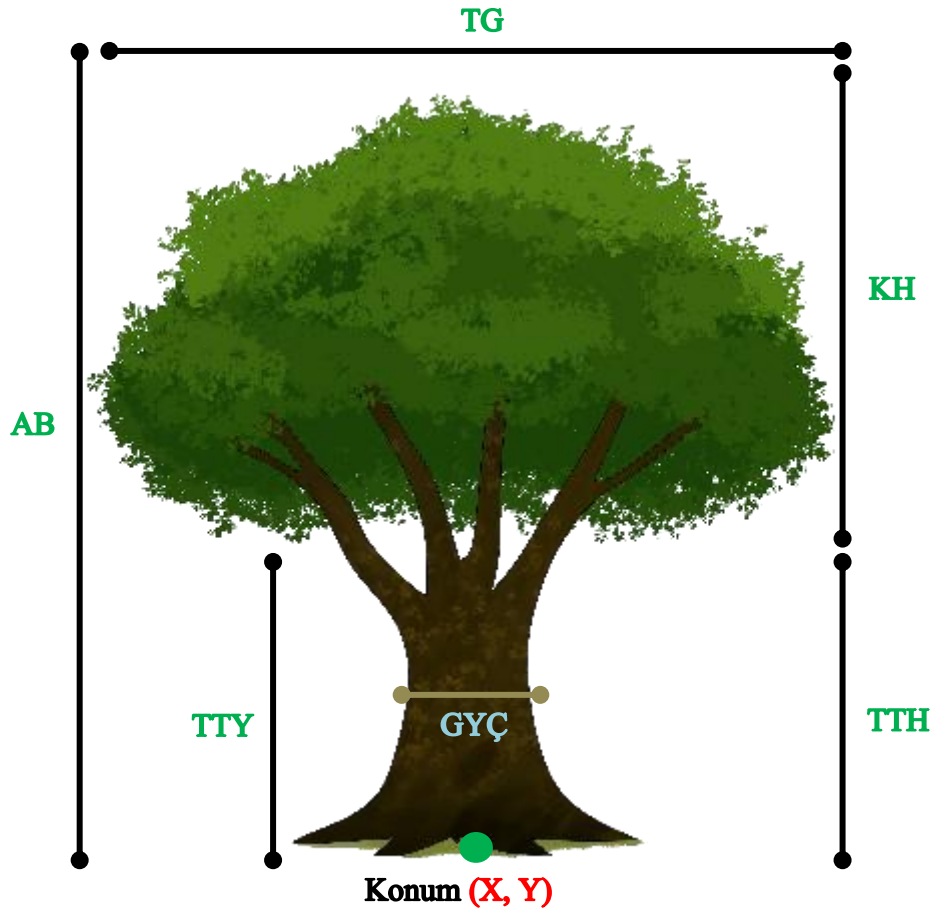
1.2.6. Ağaç Metrikleri

Ağaç metrikleri, ormanların ve bitki örtüsünün analizinde biyokütle, karbon depolama potansiyeli, sağlık değerlendirmesi ve büyüme oranları gibi unsurları içeren hayati göstergeler olarak hizmet eder. Bu metrikler, özellikle uzaktan algılama yöntemlerinden elde

edilen verilerle desteklendiğinde, ağaçların durumu ve ekolojik etkileri hakkında temel bilgiler sağlar. Çeşitli bitkilerin ve ağaçların özgün spektral imzaları, yansıma değerlerinin çeşitli matematiksel formüllerle irdelenerek, bitki canlılığı ve klorofil yoğunluğu hakkında önemli bilgiler elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Taç genişliği, ağaç yüksekliği ve gövde çapı gibi yapısal özellikler, karbon depolama potansiyelini tahmin etmek için kullanılabilir (Asner ve Mascaró, 2014). Ayrıca, bu metrikler yangınlara karşı dayanıklılık, ekosistem hizmetleri ve biyolojik çeşitlilik gibi konuların değerlendirilmesinde de kritik bir rol oynamaktadır. Bunun yanı sıra, ağaç metrikleri, kentsel yeşil alanların planlanmasında ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasında önemli bir yere sahip olmaktadır. Bu metriklerin güvenilirliği ve yorumlanabilirliği için doğru eşik değerlerinin belirlenmesi analiz doğruluğu için önem arz etmektedir.

Ormanlık alanlardaki meşcere parametrelerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi, orman amenajman planlarının hazırlanması için temel bir unsur olmaktadır. Literatürde tanımlanan temel ağaç metrikleri ve parametreleri şekil 4'te gösterilmiştir.

- Göğüs Yüksekliğindeki Çap (GYÇ- DBH)
- Ağaç Boyu (AB- TH)
- Taç Genişliği (TG- CW)
- Taç Taban Yüksekliği (TTY- CBH)
- Taç Taban Hacmi (TTH- CBV)
- Kanopi/Taç Hacmi (KH- CV)



Şekil 4. Ağaç Parametrelerinin Şeması (Bahadır, 2023)

Bunun yanı sıra, ağaçların sayısı ve ağaç merkezlerinin mekânsal konumu, envanter araştırmaları için önemli parametrelerden olmaktadır. Bu parametreler, orman ekosistemlerinin yapısal ve işlevsel özelliklerini bütüncül bir şekilde kaydedilmesine katkıda bulunmaktadır. Sürdürülebilir orman yönetimi yaklaşımlarının geliştirilmesinde de önemli bir rol oynamaktadır.

Ağaç merkezi koordinatlarının belirlenmesi, orman envanteri ve ekolojik araştırmalar açısından kritik bir süreçtir. İlk olarak, bireysel ağaçların konumlarını doğru bir şekilde temsil etmek amacıyla ağaç taç sınırları vektör veya raster formatında elde edilir. Daha sonra, her bir ağacın taç poligonunun geometrik merkezi (centroid) hesaplanarak potansiyel ağaç merkezi olarak belirlenir. Alternatif olarak, taç sınırları içerisindeki yoğunluk merkezini belirlemek için ağırlıklı ortalama veya medyan bazlı teknikler kullanılabilir. Bu yoğunluk odaklı yöntemler, taç alanı içindeki biyokütle dağılımını veya yansıtıcılık değişimlerini göz önünde bulundurarak merkezi konumun doğruluğunu artırır.

Ayrıca, eğimli arazilerde veya örtüşen taç yapılarında hataları en aza indirmek için nokta yoğunluk fonksiyonları ve uzamsal enterpolasyon yöntemleri uygulanabilir. Bu yaklaşım, özellikle karmaşık ve yoğun orman örtüsüne sahip alanlarda bireysel ağaçların hassas bir şekilde tespit edilmesini sağlamada büyük avantaj sunmaktadır. Sonuç olarak, ağaç merkezi koordinatlarının matematiksel yöntemlerle belirlenmesi, uzaktan algılama ve CBS tabanlı ekolojik analizlerde önemli bir ilerleme sağlamaktadır.

Taç genişliği, ağaç metrikleri çerçevesinde, bir ağacın tepe kısmında bulunan dallar ve yaprakların kapladığı yatay alanın genişliğini ifade eder. Bu yapısal parametre, ağacın toplam biyokütlesi ve fizyolojik fonksiyonlarının değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Fizyolojik fonksiyonların değerlendirilmesi de fotosentetik verimliliğin belirlenebilmesinde bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Taç genişliği, ağacın karbon depolama kapasitesi ile doğrudan ilişkilidir ve genellikle daha geniş bir taç, daha yüksek klorofil yoğunluğu ve artmış yaprak alanı indeksi (LAI) ile ilişkili olmaktadır; bu da ağacın genel sağlık durumu ve büyüme verimliliğini yansıtmaktadır.

Ekosistem düzeyinde, taç genişliği, ormanlık alanlardaki taç örtüsünün yayılma derecesini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır ve ağaç türleri arasındaki rekabet dinamiklerini etkilemektedir. Ayrıca, bu metrik, ağaçların mikroklimatik yönetim özelliklerine ilişkin su buharlaşması ile rüzgârın azaltılması gibi kritik bilgiler sunarak önemli ekosistem hizmeti olarak temsil edilmektedir. Bu hizmetler, özellikle kentsel alanlarda, taç genişliğinin gölgeleme, kentsel ısı adası etkilerinin hafifletilmesi ve yağmur suyu yönetimi gibi pratik uygulamalardaki rolünü de vurgulamaktadır (Pretzsch, 2014).

Son yıllarda, LiDAR ve IHA tabanlı görüntüleme uygulamaları gibi gelişmiş uzaktan algılama teknolojileri, çeşitli matematiksel formüller, taç genişliğinin daha hassas ve doğru ölçümlerini mümkün hale getirmiştir. Bu teknolojiler hem bireysel ağaçlar hem de peyzaj ölçeğinde taç yapısının ayrıntılı analizini sağlamaktadır. Ayrıca, taç genişliğindeki değişiklikler, ağaçların çevresel stres faktörlerine, kuraklık, hastalık ve diğer ekolojik baskılara verdikleri tepkilerin izlenebilmesi için kritik bir gösterge olarak kullanılabilir. Bu durum, taç genişliğinin yalnızca bireysel ağaç sağlığının değerlendirilmesinde değil, aynı zamanda orman ekosistemlerinin daha geniş ekolojik sürdürülebilirliğinin analiz edilmesinde de önemli yapmaktadır.

Ağaç taç genişliği, ekolojik araştırmalarda ve kentsel planlamada çok yönlü bir rol oynamaktadır. Ağaç sağlığı, orman dinamikleri ve çevre yönetimi konusunda temel bilgiler sunmaktadır. Bu metrik, doğal ve yapay çevrelerde sürdürülebilirlik zorluklarına yanıt

arayan daha geniş çevresel değerlendirmelere entegrasyonu ile önem kazanmaktadır (EKER vd., 2022).

Ağaç stresi, ağaçların çeşitli çevresel ve biyolojik etkilere karşı gösterdiği olumsuz tepkiler olarak belirtilmektedir. Bu stres, ağacın metabolik fonksiyonlarını, büyümesini ve genel canlılığını olumsuz yönde etkileyen bir dizi fizyolojik, yapısal ve biyokimyasal karakteristik değişikliği başlatmaktadır. Ağaç stresinin nedenleri, abiyotik (canlı olmayan) ve biyotik (canlı) faktörler olarak sınıflandırılmaktadır:

- Abiyotik stres, kuraklık, aşırı sıcaklık, don, toprak tuzluluğu, su taşkınları, ağır metal kirliliği ve hava kirliliği gibi çevresel koşullarla ilişkilidir. Bu faktörler, ağacın su ve besin alımını engelleyebilir, fotosentez verimliliğini azaltabilir ve genel dayanıklılığını zayıflatır.
- Biyotik stres, zararlılar, hastalıklar, patojenler ve parazitler gibi yaşayan organizmalarla etkileşimlerden kaynaklanmaktadır. Bu tür stres, yapraklara, dallara ve köklere zarar vererek ağacın fizyolojik dengesini bozabilir.

Stres altındaki ağaçlar genellikle yaprak dökümü, klorofil kaybı, gelişim geriliği, taç yoğunluğunun azalması ve kuruma gibi belirtiler göstermektedir. Bu tür stres, ağacın fotosentez kapasitesini, karbon depolama potansiyelini ve sağladığı ekosistem hizmetlerini olumsuz etkilemektedir. Uzun süreli stres, nihayetinde ağaç ölümü veya orman ekosistemlerinde önemli değişimlere yol açmaktadır.

Ağaç stresini tanımlamak ve değerlendirmek, etkili orman yönetimi, kentsel yeşil alan geliştirme ve koruma çabaları için önem arz etmektedir. Bu nedenle, stres etkilerinin izlenmesi ve uygun müdahale stratejilerinin geliştirilmesi için uzaktan algılama ile spektral analiz yöntemleri daha ön plana çıkmaktadır (Polle ve Rennenberg, 2019).

1.2.7. Zemin Filtreleme (SMRF)

Basit Morfolojik Filtre (SMRF) algoritması, nokta bulutları içinde zemin ve zemin dışı noktaların ayrılması için tasarlanmış olup, dört ana aşamayı kapsamaktadır. İlk olarak, veri setindeki en düşük kotlu noktaları korumak amacıyla bir minimum yüzey ($Z_{\min}$) oluşturulmaktadır. Ardından, belirlenen bir maksimum değere göre bir arama penceresi tanımlanır ve minimum yüzey üzerinde metrik işlemler uygulanarak, ızgara hücrelerinin zemin veya zemin dışı özelliklere karşılık gelip gelmediği belirlenmektedir. Üçüncü aşamada, ızgaralınmış nokta bulutundan bir SYM/DEM oluşturulmaktadır. Son aşamada ise

orijinal veri setindeki noktalar ile SYM/DEM arasındaki ilişki incelenerek zemin noktaları etkili bir şekilde filtrelenmektedir.

SMRF algoritmasında minimum yüzey alanının ($ZI_{\min}$) hesaplanmasının ardından, nokta bulutu ızgaralara bölünerek bir raster veri kümesi oluşturulmaktadır. Ardından, $ZI_{\min}$ ızgarasında ardışık bir metrik işlem uygulanır ve işlem hem erozyon hem de genişleme tekniklerini içeren bir açma işlem sıralamasından oluşmaktadır. İlk olarak genişleme filtresi uygulanmaktadır, sonrasında erozyon filtresi uygulanmaktadır. Bu yinelemeli filtreleme sırası, her bir ızgara hücrelerini zemin veya zemin dışı olarak sınıflandıran bir ikili maske oluşturmaktadır. Algoritma, bu ikili maskeyi kullanarak orijinal minimum yüzeyi düzenlemektedir, zemin olmayan hücreleri etkili bir şekilde ortadan kaldırarak geçici bir Dijital Yükseklik Modeli (DEM) üretmektedir. Algoritmanın son aşamasında, zemin ve zemin dışı noktaların tespiti gerçekleştirilmektedir. Bu işlem, her bir noktanın geçici Dijital Yükseklik Modeli ile arasındaki dikey mesafenin değerlendirilmesini ve ardından bir eşik değerinin hesaplanmasını içermektedir. Orijinal noktaların zemin sınıfına ait olup olmadığı, dikey mesafe ve uygulanabilecek ek ölçeklendirme parametrelerine bağlı olarak belirlenmektedir (Pingel vd., 2013).

- LiDAR verileri, yükseklik değerlerinden oluşan bir yüzey haline getirilmektedir: $Z(x, y)$.
- Bu yüzey üzerinde farklı pencere boyutlarıyla morfolojik açma işlemleri denklem 9 kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

$$Z_{\text{open}}^{(i)} = \text{Opening}_{ri}(Z) \quad (9)$$

- Her noktanın kendi çevresine göre zeminden ne kadar yukarıda olduğu denklem 10 kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$\Delta z_i = z_i - Z_{\text{open}}^{(i)} \quad (10)$$

- Hesaplanan fark belirli bir eşğin altındaysa nokta zemin olarak kabul edilmektedir.
- Aksi durumda zemin üstü nokta olarak kabul edilmektedir.
- Sonuç olarak koşullandırma mantığına ait işlemler denklem 11'de belirtilmektedir.

$$\Delta z_i < T(r_i) - \text{Zemin Noktası} \quad (11)$$

SMRF algoritması, zemin ve zemin dışı noktaların etkili bir şekilde filtrelenmesi için birkaç parametrenin belirlenmesini gerektirmektedir. Bu parametreler, maksimum arama penceresi yarıçapı, eğim eşiği, yükseklik eşiği ve yükseklik eşiği ölçeklendirme faktörünü içerir ve bunların tümü arazinin eğimi ve topografyasına göre belirlenmektedir. Yapılandırma elemanı, genişleme ve erozyon gibi metrik işlemlerde kullanılan hücre boyutunu belirleyen parametreyi ifade etmektedir. Eğim eşiği, minimum yüzey haritasındaki ızgaralardan zemin ve zemin dışı noktaların ayrılmasını sağlayan kritik bir değerlendirme ölçütü olarak işlev görmektedir.

1.2.8. MCWS

Watershed segmentasyonunun başarılı bir sonucu, tamamen görüntü kontrastına bağlı olmaktadır. Görüntü alımı sırasında kontrast bozulabilmektedir. Watershed algoritması, düşük kontrastlı görüntülerde aşırı segmentasyon (over-segmentation) veya yetersiz segmentasyon (under-segmentation) üretebilmektedir. Bunu önlemek için Watershed Algoritması, sınır işaretleri (Marks) üzerinde kontrol sağlanarak geliştirilmektedir. Bu nedenle önerilen yöntem, İşaretçi Kontrollü Watershed Algoritması (Marker Controlled Watershed Algorithm) olarak adlandırılmaktadır. İşaretçi Kontrollü Watershed, sınırları kontrol ederek aşırı ve yetersiz segmentasyonu önlemektedir. Bir görüntüde birbirine temas eden nesneleri ayırmak, görüntü işleme alanındaki en zor işlemlerden biri olmaktadır. Watershed dönüşümü ile segmentasyon, ön plan nesneleri ve arka plan bölgelerinin tanımlandığı durumlarda etkili bir şekilde çalışmaktadır (Niranjana Kavi K. vd., 2012).

Watershed segmentasyonu, bir görüntüde bitişik nesneleri ayırt etmek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, görüntüyü topografik bir yüzey olarak ele alarak “yakalama havzaları” (catchment basins) ve “watershed sırt çizgileri” (watershed ridge lines) tanımlamaktadır. Bu bağlamda, parlak pikseller yüksek noktalar, koyu pikseller ise daha alçak seviyeler olarak değerlendirilmektedir. Watershed dönüşümünün etkinliği hem ön plan nesneleri hem de arka plan bölgeleri net bir şekilde işaretlendiğinde önemli ölçüde artmaktadır. İşaretçi kontrollü watershed segmentasyonu, doğruluğu sistematik adımlar aracılığıyla daha da iyileştirmektedir. İlk olarak, segmentasyon fonksiyonu oluşturularak

hedef nesnelerin koyu bölgeler olarak görüldüğü bir görüntü elde edilmektedir. Daha sonra, her nesneye karşılık gelen bağlı piksel kümeleri ön plan işaretleyicileri olarak belirlenmektedir. Ardından, herhangi bir nesneyle ilişkili olmayan pikseller arka plan işaretleyicileri olarak atanmaktadır. Segmentasyon fonksiyonu, minimum değerlerin yalnızca ön plan ve arka plan işaretleyicilerinin bulunduğu konumlarda oluşmasını sağlayacak şekilde ayarlanmaktadır. Son aşamada, değiştirilmiş segmentasyon fonksiyonuna watershed dönüşümü uygulanarak bitişik nesnelerin sınırları belirlenmektedir. Bu yöntem, nesnelerin birbirine yakın olduğu durumlarda segmentasyon hatalarını en aza indirerek genel doğruluğu artırmada oldukça avantajlı olmaktadır (Parvati vd., 2008).

- Gradyan görüntüsünün kenarlarının vurgulanması için uygulanan denklem 12 aşağıda belirtilmiştir. $I(x, y)$ gri seviye girdi görüntüsü, ∇ , gradyan

$$G(x, y) = \|\nabla I(x, y)\| \quad (12)$$

- Zemin ve nesne bölgeleri denklem 13'te gösterildiği şekilde tanımlanmaktadır.

$$M(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{Nesne} \\ 2 & \text{Zemin} \\ 0 & \text{İşaretlenmemiş} \end{cases} \quad (13)$$

- Segmentasyon, $G(x, y)$ gradyanını en az artıracak şekilde, $M(x, y)$ işaretleyicilerinden genişleyen denklem 14'te ifade edilen bölgelerden oluşmaktadır.

$$W(G, M) = \text{Bölgelere ayrılmış } \Omega \text{ Alanı} \quad (14)$$

- Her piksele denklem 15'te gösterildiği şekilde bölge etiketi atanır.

$$S(x, y) = \begin{cases} i & \text{piksel (x, y) marker i'ye ait watershed bölgesi} \\ 0 & \text{watershed sınırı (kenar)} \end{cases} \quad (15)$$

1.2.9. NDVI ve NDRE İndeksleri

Spektral niteliklerin yorumlanmasında çeşitli matematiksel formüller kullanılarak belirli nicelikler ön plana çıkarılmaktadır. Böylelikle tespit edilmek istenen niteliğe ait özelliklerin daha hassas gösterilmesi amaçlanmaktadır. Klorofil analizi sonucunda bulunan

değerlerin eşik değeri ile yorumlanmasıyla ağaçlara ait çeşitli sağlık sonuç sınıflandırması yapılmıştır.

NDVI indeks değeri, kırmızı ve yakın kızılötesi spektral bantları arasındaki farkın normalleştirilmesiyle elde edilmektedir ve denklem 14'teki matematiksel formülüyle ifade edilmektedir. Sağlıklı bitkiler, fotosentez sırasında kırmızı ışığı etkili bir şekilde soğururken, yakın kızılötesi ışığı önemli ölçüde yansıtmaktadır. NDVI sonucunda elde edilen değerler '-1 ile +1' arasında değişmektedir. NDVI, çevresel araştırmalar, tarımsal verimlilik değerlendirmeleri, kuraklık analizleri ve arazi örtüsü sınıflandırması gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Huang vd., 2021).

$$NDVI = \frac{(NIR - Kırmızı)}{(NIR + Kırmızı)} \quad (16)$$

NDRE, bitkilerde klorofil içeriğini ve azot seviyelerini değerlendirmek için kullanılan bir diğer önemli spektral indekstir. Bu indeks, kırmızı kenar ve yakın kızılötesi bantları arasındaki yansıma değerlerinin farkının analiz edilmesiyle hesaplanmaktadır ve denklem 15'teki matematiksel formülüyle ifade edilmektedir. NDRE ile NDVI arasındaki önemli bir fark, NDRE'nin kırmızı kenar bandını kullanmasıdır (Sharifi ve Felegari, 2023).

$$NDRE = \frac{(NIR - Kırmızı Kenar)}{(NIR + Kırmızı Kenar)} \quad (17)$$

Yapılan çalışmada tespit edilen taçlarda ve atanan ROI'lerin sınıflandırılmasında bu indeksler eşik değerleriyle birlikte kullanılmıştır.

1.2.10. Piksel Bazlı Doğruluk Analizi

Doğruluk analizi, elde edilen sonuçların gerçek referans verilerle karşılaştırılarak modelin veya analitik sürecin başarısının belirlenmesi sürecidir. Akademik literatürde, bir modelin doğruluğunu değerlendirmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri piksel bazlı doğruluk analizidir. Bu yaklaşım hem çıktının hem de referans verilerin raster formata dönüştürülmesini gerektirir ve doğrudan piksel seviyesinde karşılaştırma yapılmasına imkân tanır. Bu süreç, dört temel metrik üzerinden değerlendirme yapmayı mümkün kılar: Doğru Pozitif (DP), Doğru Negatif (DN), Yanlış Pozitif (YP) ve Yanlış Negatif (YN). Analiz sırasında, sonuç ve referans verilerin raster görüntülerinin satır ve sütun piksel sayılarının

eşit olması sağlanmalıdır. Doğruluk analizinde, bu dört metrik ile ilgili piksel sayılarının belirlenmesi amaçlanır. Her piksel, bu dört kategoriye göre sınıflandırılarak metriklerin temsil düzeyleri değerlendirilir. Bu analiz, modelin doğruluğunun net bir şekilde ölçülmesini ve sonuçların güvenilirliğinin belirlenmesini sağlar.

- Doğru Pozitif (DP): Bu metrik, modelin doğru bir şekilde pozitif olarak tanımladığı ve gerçekten pozitif olan piksellerin sayısını yansıtır. Diğer bir deyişle, modelin doğru bir şekilde tespit ettiği pozitif durumlardır.
- Doğru Negatif (DN): Bu metrik, modelin doğru bir şekilde negatif olarak tanımladığı ve gerçekten negatif olan piksellerin sayısını yansıtır. Bu örnekler, modelin doğru bir şekilde tanımladığı negatif durumları temsil eder.
- Yanlış Pozitif (YP): Bu metrik, modelin pozitif olarak tanımladığı ancak aslında negatif olan piksellerin sayısını gösterir. Bu bağlamda, modelin negatif örnekleri yanlış bir şekilde pozitif olarak sınıflandırdığı piksellerdir.
- Yanlış Negatif (YN): Bu metrik, modelin negatif olarak tanımladığı ancak aslında pozitif olan piksellerin sayısını gösterir. Bu pikseller, modelin yanlış bir şekilde pozitif örnekleri negatif olarak sınıflandırdığı durumları yansıtır.

Dört temel metriğin belirlenmesinin ardından, bu metriklerle ilişkili piksel sayıları, literatürdeki yaygın doğruluk değerlendirme standartlarına göre doğruluk oranlarını hesaplamak için kullanılır. Piksel bazlı doğruluk analizleri için en sık atıfta bulunulan değerlendirme kriterleri, tamlık (Cp), doğruluk (Cr), kalite (Q), birleşim/birleşim oranı (IoU), F1-skoru ve genel doğruluk (OA) içerir. Akademik literatürde, kalite metriği genellikle IoU metriği yerine kullanılır, çünkü her iki metrik de aynı formüle dayanmaktadır. Bu değerlendirme kriterlerine ait özel denklemler, denklem (9), (10), (11), (12) ve (13)'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tamlık (Cp), referans görüntüsünde doğru bir şekilde pozitif olarak tahmin edilen piksellerin oranını yansıtır. Doğruluk (Cr), tahmin edilen görüntüde doğru bir şekilde pozitif olarak tahmin edilen piksellerin oranını gösterir. Kalite (Q), referans ve tahmin edilen raster görüntüler üst üste bindirildiğinde pozitif olarak sınıflandırılan piksellerin oranını ifade eder. Genel doğruluk (OA), tüm piksel sayısı arasında doğru bir şekilde obje veya non-obje olarak sınıflandırılan piksellerin oranını hesaplar. F1-skoru, tamlık ve doğruluk metriklerinin harmonik ortalaması olarak türetilir (Cai vd., 2018).

$$C_p = \frac{DP}{DP + YN} \quad (18)$$

$$C_r = \frac{DP}{DP + YP} \quad (19)$$

$$Q = \frac{DP}{DP + YN + YP} \quad (20)$$

$$OA = \frac{DP + DN}{DP + YN + YP + DN} \quad (21)$$

$$F - SKOR (F1) = \frac{2 \times C_p \times C_r}{C_p + C_r} \quad (22)$$

1.2.11. Nesne Tabanlı Doğruluk Analizi

Literatürde doğruluk değerlendirmesi için diğer bir yöntem de nesne tabanlı analizdir. Piksel bazlı analizde, referans ve tahmin edilen görüntülerin pikselleri doğrudan karşılaştırılarak doğruluk belirlenirken, nesne tabanlı doğruluk analizinde objelerin doğrudan karşılaştırılmasına odaklanılmaktadır. Bu yaklaşımda, Doğru Pozitif (DP), Doğru Negatif (DN), Yanlış Negatif (YN) ve Yanlış Pozitif (YP) metrikleri obje düzeyinde değerlendirilmektedir. Doğruluk oranları, bu metrikler için obje sayılarının piksel bazlı doğruluk analizinde kullanılan aynı değerlendirme kriterlerine dahil edilerek hesaplanmaktadır. Örneğin, referans görüntüsünde bir ağaç doğru bir şekilde çıktı görüntüsünde ağaç olarak tanımlanırsa, nesne tabanlı doğruluk analizinde bu obje DP olarak sınıflandırılmaktadır. Tersine, bir ağaç objesi, referansta sarıçam olarak etiketlenmişken yanlışlıkla kızılçam olarak tanımlanırsa, bu obje YN kategorisinde yer almaktadır. Referansta bulunmayan bir ağaç, çıktı görüntüsünde sarıçam olarak tahmin edilirse, bu obje YP olarak işaretlenmektedir. Son olarak, ağaç bulunmayan bir nokta doğru bir şekilde tahmin edilirse, bu nokta (obje) DN olarak sayılır. Bu metrikler karışıklık matrislerinde ifade edilmektedir (confusion matrix). Karışıklık matrislerine ait sayılar daha sonra, piksel bazlı

analizde belirlenen değerlendirme kriterleri (Cp, Cr, Q, OA ve F1) için denklemlere girdi olarak kullanılmaktadır ve doğruluk oranları hesaplanmaktadır (Yıldırım, 2022) (Şekil 5).

Piksel bazlı doğruluk analizi, bir görüntüdeki toplam piksel sayısını, doğru pozitifler (TP), doğru negatifler (TN), yanlış negatifler (FN) ve yanlış pozitifler (FP) gibi dört ana metriğin toplamını kullanarak ölçmektedir. Buna karşın, obje bazlı doğruluk değerlendirmesi tüm objeleri değerlendirmektedir, bu da toplam metrik sayılarının referans obje sayısını aşmasına neden olabilmektedir. Her iki doğruluk analiz yöntemi de veri toplama süreçlerine dayanmaktadır ve bu süreçler insan katkısı gerektirdiğinden, %100 doğruluk oranına ulaşma olasılığı olağan değildir (Şiljeg vd., 2022).

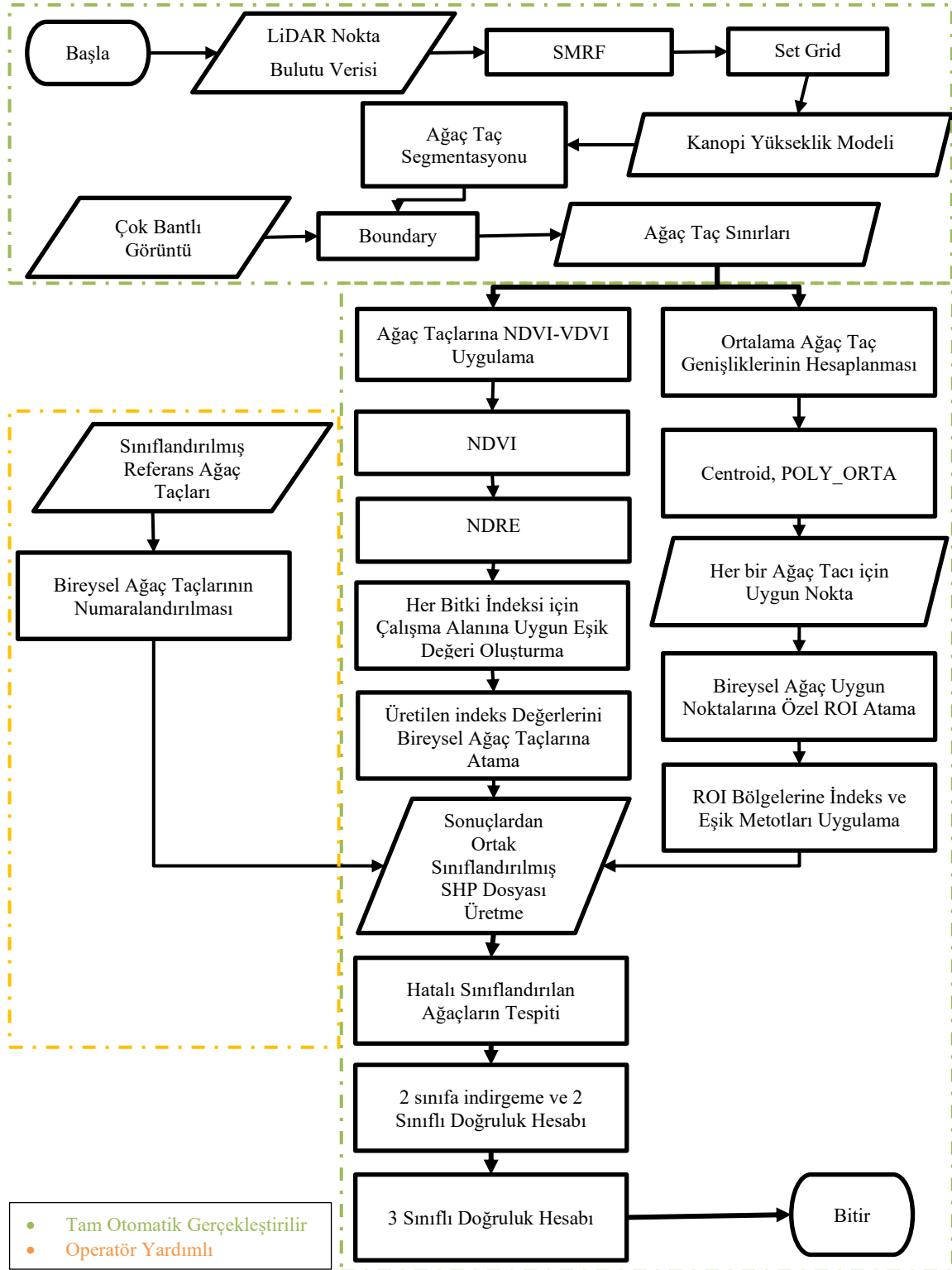
		Doğru Sınıf		
		A	B	C
Tahmin Edilen Sınıf	A	DP _A	E _{BA}	E _{CA}
	B	E _{AB}	DP _B	E _{CB}
	C	E _{AC}	E _{BC}	DP _C

Şekil 5. Çok Sınıflı Bir Sınıflandırmaya, 3×3 boyutuna sahip bir karışıklık matrisi (confusion matrix)

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

İlgili çalışmanın gerçekleştirilmesinde önerilen yaklaşım ile uygulanan iş akış diyagramı Şekil 6’te ayrıntılı olarak şekillerle gösterilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmada; LiDAR nokta bulutundan ağaç taç sınırlarının çıkartılması, ortofoto ile ağaç taç sınırlarının karşılaştırılması, bireysel ağaç taç sınırlarına bireysel ROI’lerin atanması, iki ve üç sınıflı mevcut durum tahmini, doğruluk analizi olmak üzere beş temel başlıktan oluşmaktadır. Uygulamanın ilk aşamasında, girdi LiDAR nokta bulutundan ağaç tepelerinin tespit edilmesi için Kanopi Yükseklik Modeli (KYM) kullanılmıştır. Bireysel ağaç taçlarının segmentasyonu ise Watershed Segmentation (Havza Bölütleme) algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ortak bir ‘shapefile’ formatında dosyaya kaydedilerek koordinat bilgileri kaydedilmiştir. Böylelikle tüm çalışma alanındaki ağaçlar bireysel olarak koordinatlı ve ayrı ayrı etiketlenmiş şekilde çalıştırılması sağlanmıştır. Kullanılan referans veri, tespit edilen ağaç taçlarının gerçekte belirlenen sınıflar, bir operatör yardımıyla atanmasıyla oluşturulmuştur. Üretilen ağaç taç sınırlarına ait koordinatlar ile üretilen multispektral ortofoto koordinatları karşılaştırılarak ağaç taçlarına ait multispektral veriler elde edilmiştir. Tespit edilen taçlarda ‘centroid’ yöntemi ile ağırlık merkezi belirlenmiştir. Hesaplanan noktalara, bireysel taç genişliklerine uygun olan ROI’ler atanmıştır. Tespit edilen taçlar ve atanan ROI’ler kullanılarak indeks ve eşikleme yöntemleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, iki sınıflı ve üç sınıflı olmak üzere iki ayrı şekilde mevcut durumu nesne tabanlı doğruluk analiziyle değerlendirilmiştir (Şekil 6).

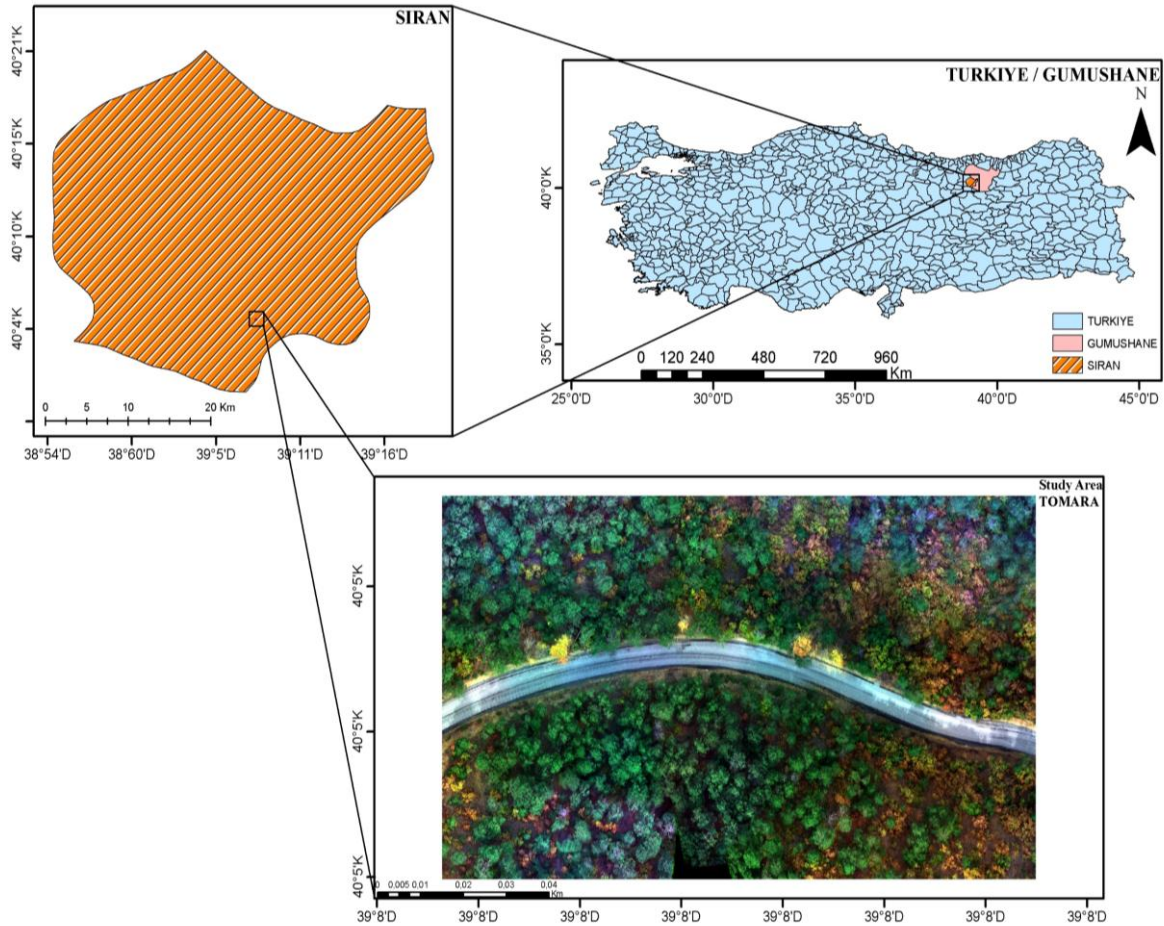


Şekil 6. İş Akış Şeması

2.1. Çalışma Alanı

Tez çalışması kapsamında Gümüşhane ili Şiran ilçesi Kozağaç köyündeki, (40° 05' 05.3713" Kuzey enlemi, 39° 07' 32.6491" Doğu boylamı) 1481 metre râkımlı, bozuk sarıçam ormanı çalışma alanı olarak seçilmiştir (Şekil 7).

Sarıçam (*Pinus sylvestris*), geniş bir coğrafi alanda yayılış gösterir ve ağırlıklı olarak Avrupa ve Asya'nın kuzey bölgelerinde bulunur. Türkiye'de bu tür, 1000 ila 2500 metre rakımlarda yetişir, sert kış koşullarına dayanıklıdır ve dondan etkilenmez. Yeterli miktarda güneş ışığına ihtiyaç duymakta ve gölgeye karşı düşük tolerans göstermektedir. Çeşitli toprak türlerine uyum sağlayabilse de iyi drenajlı topraklarda daha iyi gelişmektedir. Genç Sarıçam, genellikle piramidal bir taç yapısına sahiptir, olgunlaştıkça bu taç yapısı daha geniş ve düzensiz bir şekil almaktadır.



Şekil 7. Çalışma Alanı (Gümüşhane Kozağaç)

Tez kapsamında çalışma, segmentasyon yöntemiyle tespit edilen 413 ağaçtan oluşan ve genel orman sağlığının bozuk olarak nitelendirildiği sarıçam ormanında, yaklaşık 26.634 dönüm (yaklaşık 2.663.400 m²) alanda gerçekleştirilmiştir. Seçilen çalışma bölgesinde hem bitişik hem de seyrek yapıda ağaç dağılımı bulunmaktadır. Kapalılık açısından, düzensiz yapıda bir orman olarak değerlendirilebilmektedir. Çalışma alanında arazi üzerinde yersel bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Ağaç taçlarının segmentasyonu otomatik bir şekilde LiDAR nokta bulutu üzerinden gerçekleştirilmiştir. Ağaç segmentasyon sonuçları bir referans verisi bulunmamasından ötürü doğrulama imkânı oluşmamıştır.

2.2. Üretilen Veriler

Çalışma alanı verileri insansız hava aracı ile alım gerçekleştirilerek oluşturulmuştur. Bireysel ağaç taç segmentasyonu için LiDAR nokta bulutları kullanılmıştır, ağaç metriklerinin tahmini ise stereo görüntülerin işlenmesi ile türetilmiştir. Alımlar MATRICE 300 RTK kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uzaktan algılama verileri Micasense Altum Multispektral (Tablo 2.) ve DJI Zenmuse L1 (Tablo 3.) kullanılarak stereo görüntü ve LiDAR nokta bulutu olarak elde edilmiştir.

Tablo 2. Micsense Altum Multispektral Kamera Özellikleri

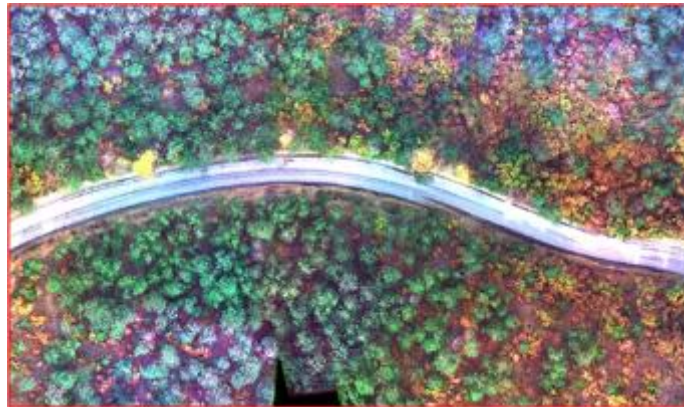
Micasense Altum Multispektral					
Kamera Özellikleri	MultiSpectral	Termal	Bant İsmi	Odak dalga boyu aralıkları güncellenmeli	Bant Genişliği
Piksel Boyutu	3.45 µm	12 µm	Mavi	475 nm	32 nm
Çözünürlük	2064 x 1544 px (3.2 MP x 5 resim başına)	160 x 120 px (0.01 K)	Yeşil	560 nm	27 nm
Görüntü Oranı	4 : 3	4 : 3	Kırmızı	668 nm	14 nm
Sensör Genişliği	7.12 x 5.33 mm (8.9 mm çapraz)	1.92 x 1.44 mm	Kızıl Bölge	717 nm	12 nm
Odak Uzaklığı	8 mm	1.77 mm	Kızıl Ötesi	842 nm	57 nm
Görüş Açısı	48° x 36.8°	57° x 44.3			
Çıktı Bit Derinliği	12-bit	14-bit			
Yer Örnekleme 120m İrtifa	5.2 cm	81 cm			
Yer Örnekleme 60m İrtifa	2.6 cm	41 cm			
Termal Duyarlılık	n/a	<50 mK			
Termal Doğruluk	n/a	+/- 5 K			

Tablo 3. DJI Zenmuse L1 Sensör Özellikleri

Zenmuse L1	
Algılama Aralığı	450 nm
Etkin nokta hızı (tek dönüş)	240.000 pts/sn
Çoklu dönüş	480.000 pts/sn
Yatay hassasiyet	10 cm (irtifa: 50m)
Dikey hassasiyet	5 cm (irtifa: 50m)
FOV (Görüş alanı)	95°
IMU Güncelleme Sıklığı	200 Hz
Açısal Hız Ölçer Aralığı	± 2000 dps
RGB Haritalama Kamerası	
Sensör Boyutu	1 inch
Çözünürlük	20 MP
Odak Uzaklığı	8,8 mm

2.2.1. Çok Bantlı Görüntüler

Bu tez kapsamında farklı bantlar için ortofoto üretilmiştir. Şekil 8 sunulan ortofoto RGB bantlarının birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Pix4D yazılımı aracılığıyla üretilmiştir. Şekil 8’de çalışma alanının görsel bir temsilini sunulmaktadır. Ortofoto oluşturma sürecine yönelik stereo alım, Matrice 300 RTK insansız hava aracına monte edilen Micasense Multispektral kamera ile 60 metre irtifada, 10 m/s hızla uçurularak 2,8 cm yer örnekleme değeriyle (GSD) gerçekleştirilmiştir. Toplamda 3000 görüntü kullanılarak beş farklı spektral bant için ortofotolar üretilmiştir. Üretilen ortofotonun özellikleri, Tablo 4’te açıklanmıştır.



Şekil 8. Çalışma Alanı Ortofoto Görüntüsü (Gümüşhane Tomara)

Tablo 4. Kullanılan Ortofoto Özellikleri

Px boyX	0,028683
Dönüklük X	0
Dönüklük Y	0
Px boyY	-0,028683
Sol Üst Köşe X	510723,781591
Sol Üst Köşe Y	4438955,224056

2.2.2. LiDAR Nokta Bulutu Verisi

Tez çalışmasında kullanılan LiDAR nokta bulutu DJI Terra programı kullanılarak *.las formatında üretilmiştir. Matrice 300 RTK ile üretilen nokta bulutu RGB kamera desteği sağlanması sayesinde noktaların gerçek renk değerleri ile temsil edilmesi sağlanmıştır. Çalışma alanında kullanılan nokta bulutuna ait örnek görsel Şekil 9 'de sunulmuştur.



(a)



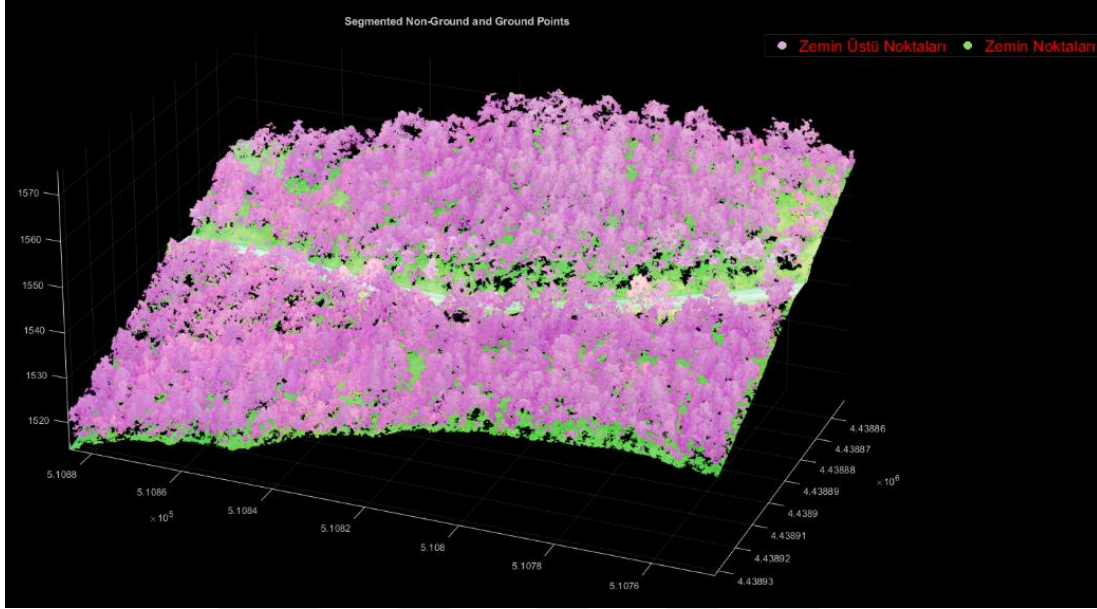
(b)

Şekil 9. a) Ağaçlık Alan LiDAR nokta bulutu 2B b)3B görünüm

2.3. Veri Hazırlık Aşaması

Önerilen yaklaşım kapsamında iki kategori veri girdi olarak kullanılmıştır. Ham nokta bulutu verisinden ağaç taç segmentasyonu elde edebilmek için, *.las formatındaki LiDAR nokta bulutu içerisinde öncelikle zemin ve zemin dışı noktaların ayrıştırılması gerekmektedir (Şekil 10). Zemin noktalarının ham veriden ayrılması, ağaçların metrik özelliklerine ilişkin bilgilerin çıkarılmasını kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, nokta bulutlarından gerekli detayların elde edilmesindeki kritik adımlardan biri, gereksiz ve gürültü noktaların veri setinden temizlenmesidir. Bu tür gürültü ve istenmeyen noktalar, kullanılan matematiksel modelin etkili çalışmasını önemli ölçüde engellemektedir. Çalışmanın bu aşamasında, zemin filtreleme işlemleri için Simple Morphological Filter (SMRF) algoritması uygulanmış ve

zemin üstü noktalar başarılı bir şekilde ayrıştırılmıştır. Bu filtreleme süreci sayesinde, ağaç noktaları ve zemin noktaları etkili bir şekilde birbirinden ayrılmış olacaktır.

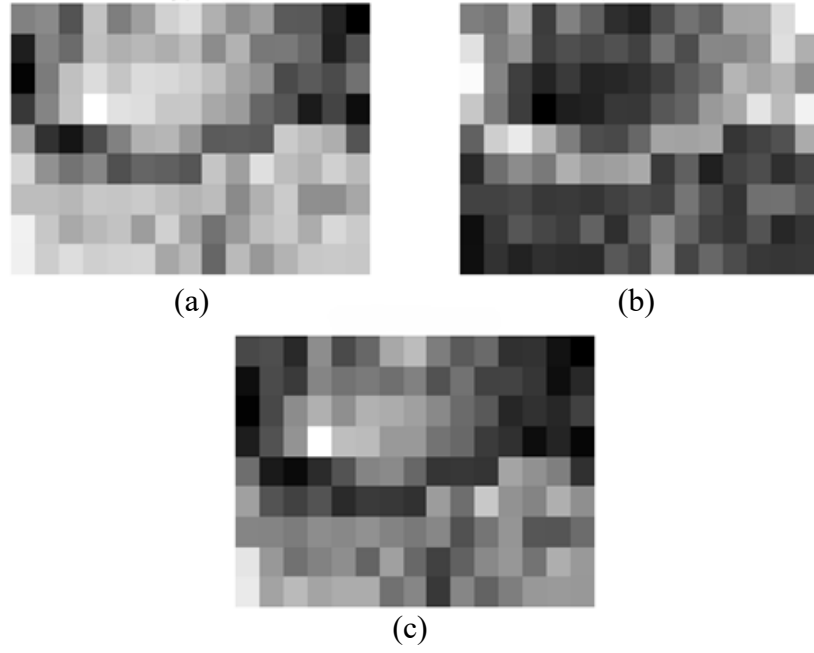


Şekil 10. Zemin Filtreleme İşlemi (Mor renk zemin üstü noktalar, yeşil renk zemin noktaları)

2.4. Kanopi Yükseklik Modeli Oluşturma ve Ağaç Taç Segmentasyonu

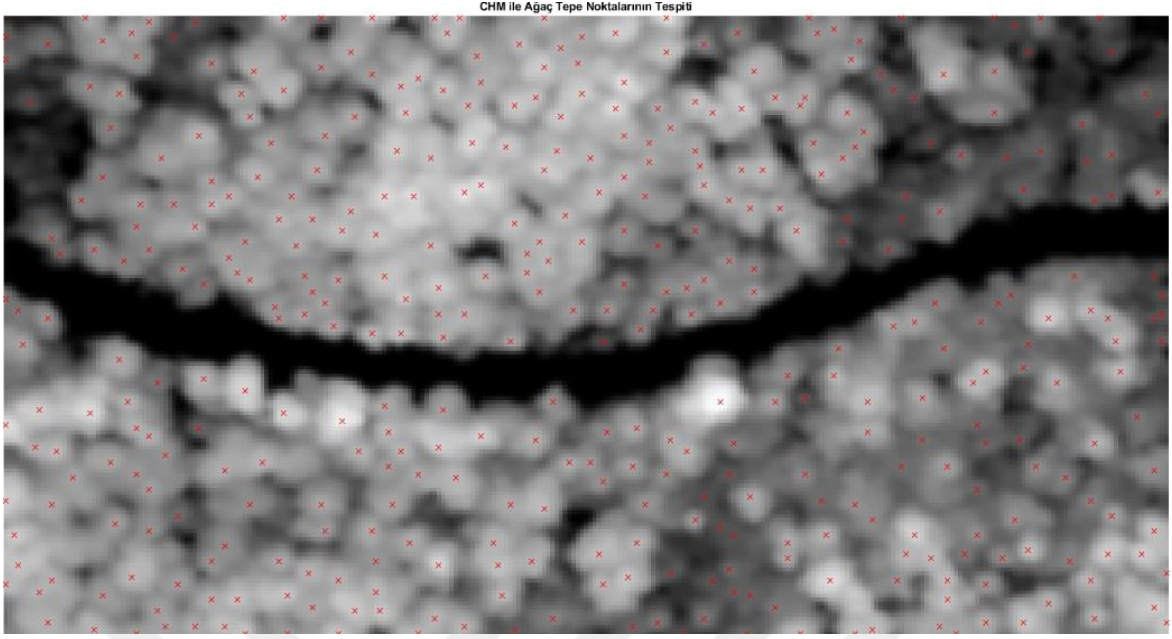
Nokta bulutlarını kullanarak modeller oluşturma sürecinde, arazinin/zeminin bitki örtüsü analizine etkilerini azaltmak için yükseklik normalleştirilmesi uygulanması gerekmektedir. Bu normalleştirme süreci, veri setindeki en düşük kotlu noktayı 0 metreye sabitleyerek yükseklik değerlerini en yüksek kotlu noktaya göre yeniden hesaplamaktadır. Normalleştirme işlemi sırasında, enterpolasyonlu zemin yüksekliğinden orijinal zemin yüksekliği çıkarılarak tüm noktaların yükseklikleri yeniden tanımlanır. Ortaya çıkan normalleştirilmiş yükseklikler, orman metriklerinin çıkarılması ve ağaç özniteliklerinin değerlendirilmesi için kritik bir girdi görevi görmektedir.

Orman metriklerinin çıkartılmasında Kanopi Örtüsü (Canopy Cover-CC), Boşluk fraksiyonu (Gap fraction-GF) ve yaprak alan indeksi (Leaf area index-LAI) orman metrikleri oluşturulmuştur (Şekil 9).



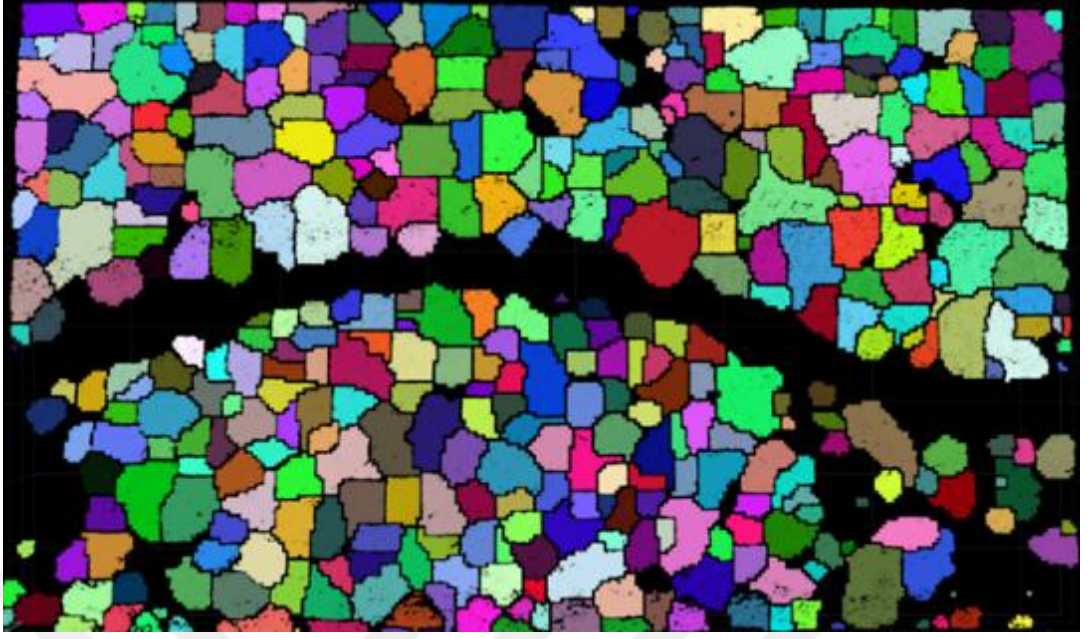
Şekil 11. Orman Metriklerinin (a) Kanopi Örtüsü, (b) Boşluk Fraksiyonu, (c) Boşluk Fraksiyonu çıkarımı

Çalışma kapsamında, LiDAR nokta bulutlarından ağaç segmentasyonu amacıyla bir Kanopi Yükseklik Modeli (KYM) üretilmiştir. Bu model, belirlenen test alanlarındaki ağaçlarla kaplı bölgelerin yüksekliklerini yansıtan bir raster temsili olmaktadır. Kanopi yükseklik modeli ile kullanılan veri setinde, ağaç merkezleri, ağaç tepe noktaları işaretlenerek belirlenmiştir (Şekil 12). KYM raster görüntüsü kullanılarak, MATLAB yazılımında bulunan ‘helperDetectTreeTops’ fonksiyonu aracılığıyla farklı pencere boyutlarıyla yerel maksimum noktalar tespit edilerek ağaç tepe noktaları belirlenmiştir. Analiz kapsamında, minimum ağaç yüksekliği eşiği 5 metre olarak belirlenmiş ve normalize edilmiş yükseklik değerleri kullanılmıştır (Gülcü vd., 2017).



Şekil 12. LiDAR Nokta Bulutundan Ağaç Tepelerini Belirleme

Kanopi Yükseklik Modeli (KYM) kullanılarak elde edilen ağaç tepe noktaları, bireysel ağaç taç segmentasyonunu gerçekleştirmek amacıyla İşaretleyici Kontrollü Havza Bölümleme (MCWS) tekniği, yaygın adıyla Havza Bölütleme algoritmasında girdi verisi olarak kullanılmıştır. Bu işlem, MATLAB yazılımı içerisinde mevcut olan “helperSegmentTrees” fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Segmentasyon süreci, filtrelenmiş KYM ile havza bölütleme algoritmasının entegrasyonu ile yürütülmüştür. Segmentasyon sonucunda LiDAR nokta bulutundan koordinatlı ağaç segmentasyon verileri elde edilmiştir (Şekil 13). Bireysel ağaç segmentasyonunun bitişik ağaç kümelerini sıklıkla tek bir varlık olarak yanlış sınıflandırması, küçük ve anlamsız segmentasyon sonuçları segmentasyon hatası olarak ele alınmıştır. Üretilen ortofoto üzerinde anlamsız olduğu, segmentasyon sonucu tespit edilen sonuçlar operatör yardımıyla veri temizliğinde elimine edilmiştir.

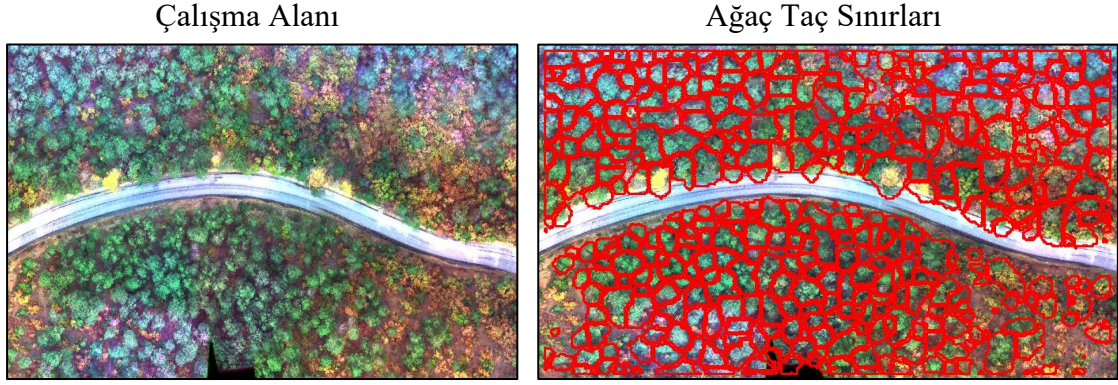


Şekil 13. Bireysel Ağaç Taç Segmentasyonu

2.5. Ağaç Taç Sınırlarının Belirlenmesi Ağaç Taç Sınırlarının Çok Banlı Görüntü Üzerinde Belirlenmesi

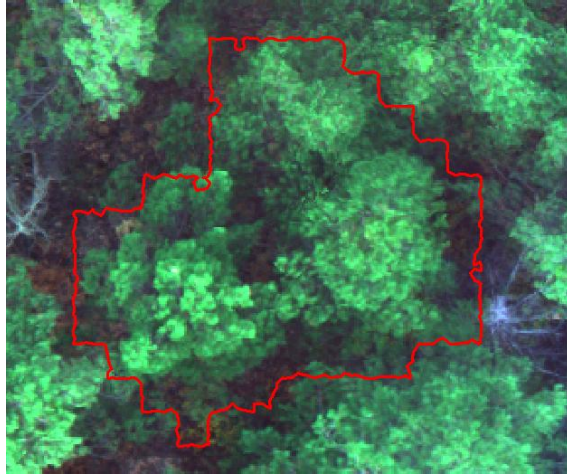
LiDAR nokta bulutu verisi üzerinde gerçekleştirilen ağaç segmentasyonu sonucunda ağaç nicelikleri elde edilmiştir. Elde edilen öznitelik verileri, her bireysel ağaç için MATLAB yazılımı içerisinde ayrı profiller oluşturularak vektör veri dosyası '*.shp' biçiminde kaydedilmiştir. Belirlenen ağaç taçları için sınır noktaları bir dizi haline getirilerek her bireysel ağaç tacı için sınırlar üretilmiştir. Bireysel tüm ağaçlar, sınır koordinatları korunarak ayrı birer ID'ye atanmıştır böylelikle, '*.shp' formatındaki ağaç taçları coğrafi bilgi sistemlerinde (CBS) analiz edilebilir hale getirilmiştir

Stereo çekilen görüntülerle üretilen beş ayrı banlı ortofoto görüntüler GlobalMapper ortamında incelenmiştir. Her ortofoto görüntüye ait bilgiler exif ve '*.tfw' uzantılı görüntü öznitelik bilgilerini depolayan dosyalardan elde edilmiştir. Görüntülerin bulunduğu piksel koordinat sistemi değerleri yeniden atanarak LiDAR nokta bulutu koordinat sistemi ile çakıştırılmıştır. Böylelikle nokta bulutu üzerinden türetilen ağaç taç sınırlarına ait shapefile dosyası, ortofoto '*.tiff' görüntü üzerinde vektör biçiminde temsil edilebilir hale gelmiştir (Şekil 14).



Şekil 14. Ağaç Taç Sınırlarının Çalışma Alanında Temsili

Tespit edilen bireysel ağaç taç sınırları ortofoto üzerinde gösteriminin gerçekleştirilebilmesi, ortofoto üzerinde sınır içinde kalan piksellere ait spektral niceliklerin çeşitli analizler ile incelenebilmesini olanaklı hale getirmiştir. İlk adımda MATLAB yazılımı kullanılarak, belirlenen sınırlar içerisinde kalan pikseller tespit edilmiştir. Oluşturulan vektör veri dosyasında bireysel ağaç taçlarına ait veriler arasında depolanarak çalışma alanında bulunan ağaçlara ait bir veri tabanı geliştirilmiştir. Böylelikle çalışma alanındaki ağaçlara ait bireysel olarak; yükseklik, taç genişliği, taç sınırları koordinatları, ortofoto üzerine düşen piksel sınır koordinatları ve sınır içerisinde yer alan piksel koordinatlarına ait veriler kayıt altına alınarak gösteriminin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır (Şekil 15).



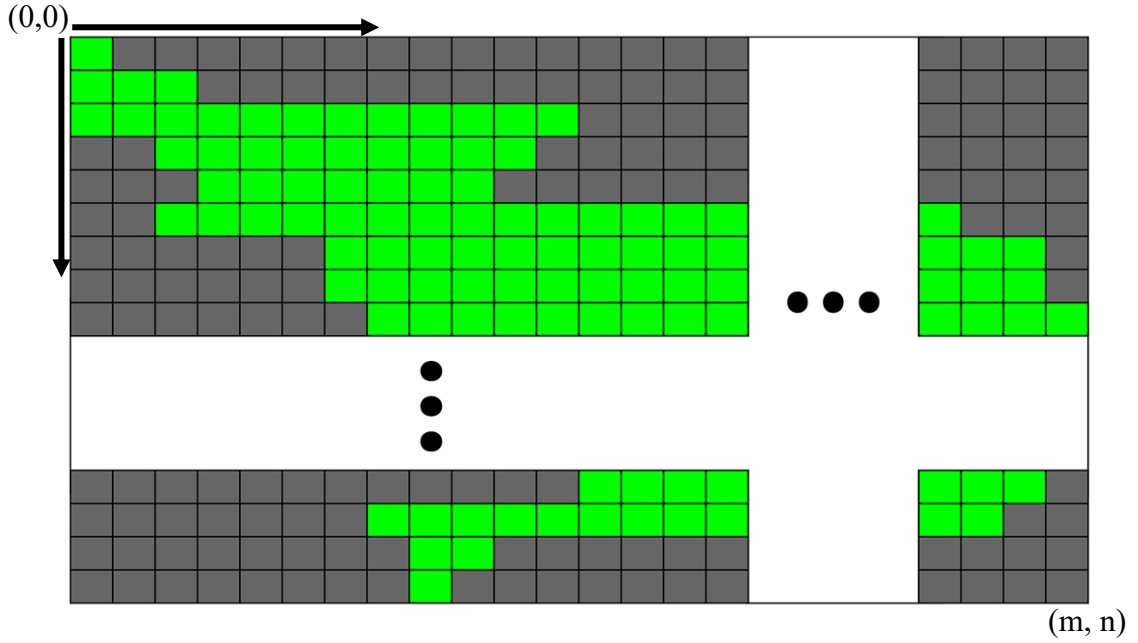
Şekil 15. Çalışma alanında tespit edilen 92 numaralı ağaca ait taç sınırları

2.6. Taç Bazlı İndis Uygulaması

Çalışmada kullanılan ortofoto görüntü, beş farklı spektral bant (Kırmızı, Mavi, Yeşil, Yakın Kızılötesi – NIR ve Kırmızı Kenar – Red Edge) ve 16 bit radyometrik çözünürlüğe sahiptir. Radyometrik çözünürlük, sensörün her piksel için kaydedebileceği yansımaya seviyelerinin sayısını ifade eder. Diğer bir bakış açısıyla 16 bit derinlik, her pikselin 2 baytlık veriyle temsil edildiğini ve 0 ile 65.535 (2^{16}) arasında yansımaya değeri alabileceğini göstermektedir. Spektral çözünürlük; sensörün elektromanyetik spektrumun farklı dalga boylarına karşı duyarlılığı, yani farklı bantlardaki yansımaları ayırt edebilme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada yüksek radyometrik ve spektral çözünürlüğe sahip görüntülerin kullanılması, gerçekleştirilen metrik analizleri destekleyerek orman örtüsüne ait yansımaya özelliklerinin daha ayrıntılı ve doğru bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

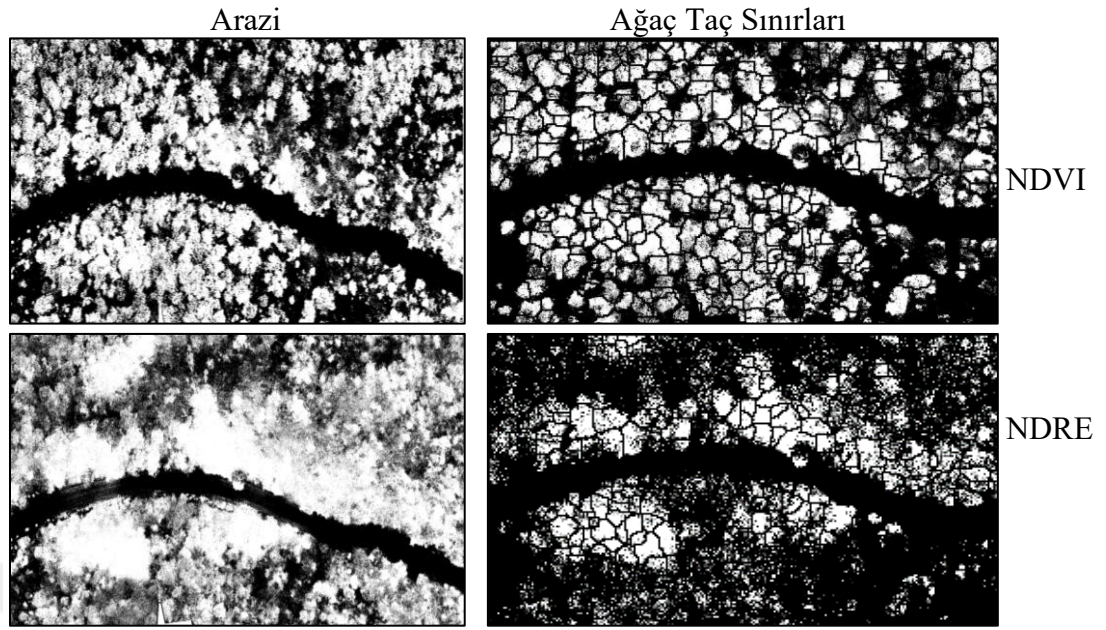
Ağaç taç sınırları LiDAR nokta bulutundan tespit edilmesi; hassas koordinatlı ağaç olarak temsil edilen koordinatların da türetilmesini olanaklı hâle getirmiştir. Taç sınırları içerisinde ilk satırın ilk numarasından aritmetik olarak artacak bir şekilde satır sonuna kadar her satır için bir dizi oluşturularak taç sınırlarının içinde kalan piksel koordinatları tespit edilmiştir.

Bireysel taç sınır kümelerinin her biri ayrı ayrı değerlendirilerek taç sınırları içinde düşen piksellerin koordinatları hesaplanmıştır. Hesaplama işlemi; m değişken satır ve n değişken sütun boyuttaki her bireysel taç için ayrı oluşturulan bir sistemde, ağaç numarası ve taç sınır koordinatları saklanarak, piksel koordinat sisteminde maksimum satır ve sütun değerleri ele alınarak gerçekleştirilir. Bulunan maksimum satır numarası döngü kuralı olurken her değişken satır numarası için maksimum ve minimum arası tüm sütun numaraları aranarak koşul satır numarasındaki tüm sütun değerlerine ait spektral değerler toplanmış olur. Taç sınır içine düşen piksel koordinatları ile spektral değerler eşleştirilerek her piksel için spektral bant üzerinde bulunan yansımaya değeri tespit edilmiştir. Şekil 16’te m satır n sütun boyutlu örnek bir ağaç taç kesitinin piksel koordinatları tespitine ait kesit sunulmuştur. Böylelikle tüm bireysel ağaç taçlarını temsil eden piksellerin spektral değerleri bulunmuş ve spektral analizler için veri tabanına kaydedilmiştir.

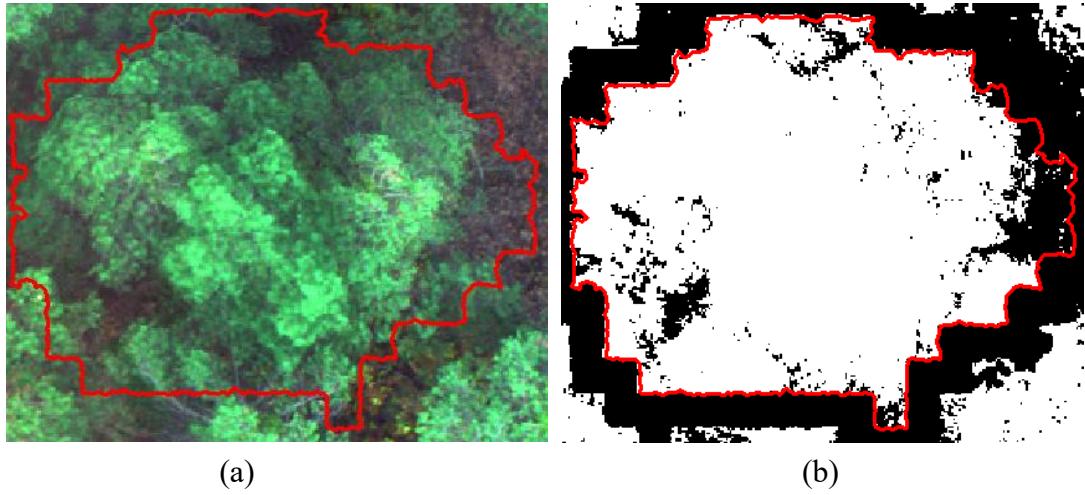


Şekil 16. Boyutları m satır n sütun boyutlu bir ağaç taç kesiti

Görüntüye ait her bantta, sensörler tarafından algılanan yansımaya değerini temsil eden pikseller bulunmaktadır. İlgilenilen ayrıntının niceliklerinin tespit edilebilmesi, ayrıntıya ait özgün koordinatların tespit edilerek yansımaya değerlerine ulaşılmasıyla mümkün olmaktadır. MATLAB yazılımıyla gerçekleştirilen çalışmada, üretilen .shp dosyasından taç sınır kayıtları çekilerek sınırlar içinde kalan yansımaya değerleri bulunmuştur. Her bant için ayrı ayrı gerçekleştirilen işlem tüm bantların değerlendirilebileceği ve ayrı kayıtlarının tutulabileceği bir veri tabanı oluşturulmasını sağlamıştır. Üretilen ağaç taçlarına ait yansımaya verisiyle her indeks için ayrı değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Böylelikle iki ayrı indeks için iki ayrı ‘arazi indeks haritası’ (Şekil 17) sonrasında da eşik değeri uygulanarak ‘indeks eşik değeri’ haritaları üretilmiştir (Şekil 18).



Şekil 17. Doğrudan Alınan Arazi Verisine Uygulanan İşlem ve Ağaç Taç Sınırlarına Uygulanan İşlemin Karşılaştırılması



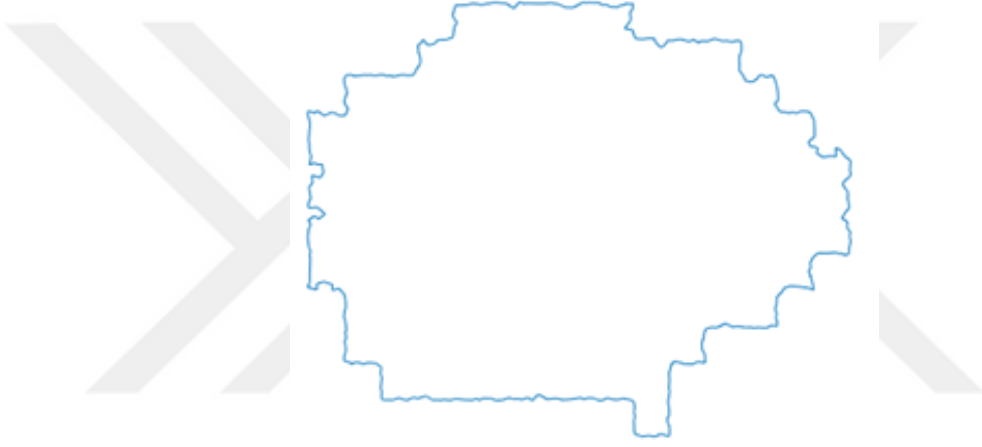
Şekil 18. (a) Çalışma Alanında Tespit Edilen 57 numaralı Ağaç Tacı (b) taç bazlı uygulanan eşik değerli NDVI analizi sonucu

Analiz işleminde kontrolün sağlanması için hem Matlab yazılımında indeks analiz matematiksel formülleriyle koordinatlı, hem de ArcMap ‘Raster hesap makinesi’ modülü kullanılarak iki farklı şekilde çıktı oluşturulmuştur. Bu sayede Matlab yazılımında

hazırlanan yaklaşımın hazır paket programla takibi, uyumluluğu ve senkronizasyonu sağlanmıştır.

2.7. Taç Merkezi Bazlı Uyarlanabilir Pencere İndis Uygulaması

Tespit edilen her ağaç tacı için; bu alanı oluşturan bütün sınır noktalarının koordinatlı olarak ‘.shp’ dosyasına kaydedilmesi gerçekleştirilmiştir. Nokta sıralamalarının birleştirilmesiyle düzlemsel bir alan oluşturularak ağaç taç betimlemeleri oluşturulmuştur (Şekil 19). Taç sınırlarının tespit edilerek sunulabilmesi, iş akış şemasında gerçekleştirilen işlemlerin görselleştirilmesinde önem arz etmektedir.



Şekil 19. 57 numaralı ağaç taç sınırının görüntüsü

Belirlenen sınır noktaları, MATLAB yazılımı ‘polyshape’ fonksiyonunda girdi olarak kullanılarak her ağacı temsilen iki boyutlu birer ‘polygon’ (vektörel çokgen) nesnesi oluşturulmuştur.

MATLAB yazılımı içerisindeki ‘polyshape. Centroid’ fonksiyonu iki boyutlu çokgen şekillerin ağırlık merkezini sayısal olarak hesaplamak için tasarlanmış bir vektör analiz aracıdır. Ağırlık merkezi, düzlemsel bir şeklin geometrik merkezini temsil eder ve bütünlük varsayımı altında şeklin dengede bulunacağı noktayı belirtir. ‘C = centroid(polyin)’ komutu polyin olarak ifade edilen polyshape nesnesine ilişkin çokgenin ağırlık merkezini verir, merkez $[1 \times 2]$ boyutlu bir vektör olarak temsil edilmektedir. Diğer bir bakışla $[x_c, y_c] = \text{centroid}(\text{polyin})$ komutu ‘c’ ağırlık merkezinin x ve y koordinatlarının ayrı ayrı alınması ve kaydedilmesine olanak sağlamaktadır. Matematiksel olarak, n adet köşe noktasına sahip

kapalı bir çokgen için ağırlık merkezinin hesaplanması için kullanılan formül aşağıda belirtilmiştir (16,17)(O'Rourke, 1998).

Bu formüllerde ifade edilen ' x_i ', ' y_i ' noktaları çokgenin köşe nokta koordinatlarını temsil etmektedir. ' A ' ifadesi çokgenin alanını temsil etmektedir (18). Çokgenlerin alan hesaplamalarıyla ilgili bilgiler, ağırlık merkezi formüllerinin temelini oluşturmaktadır (O'Rourke, 1998).

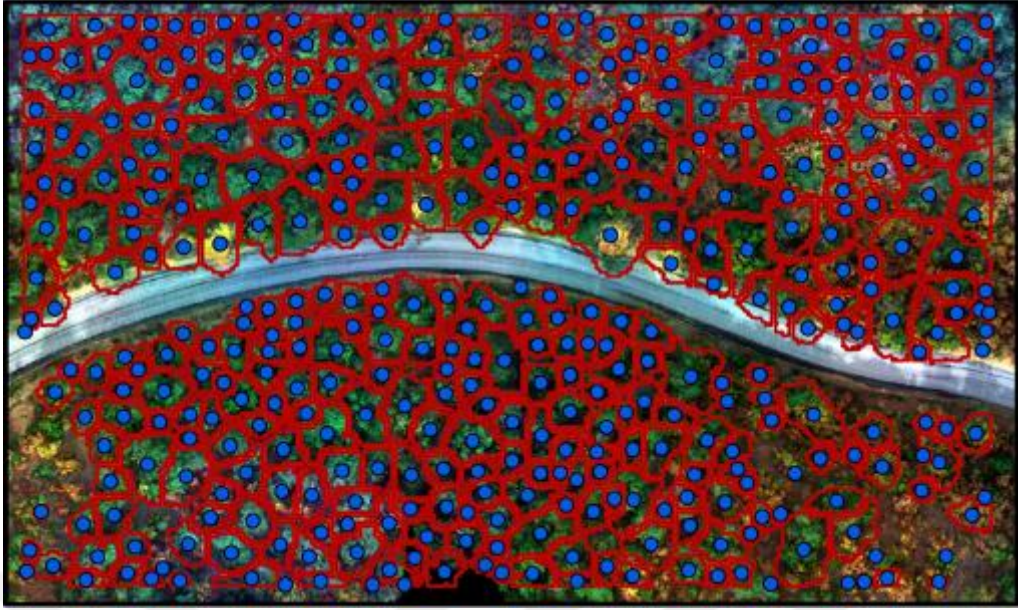
$$x_c = \frac{1}{6 \times A} \sum_{i=1}^n (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (23)$$

$$y_c = \frac{1}{6 \times A} \sum_{i=1}^n (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (24)$$

$$A = \frac{1}{2} \sum x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i \quad (25)$$

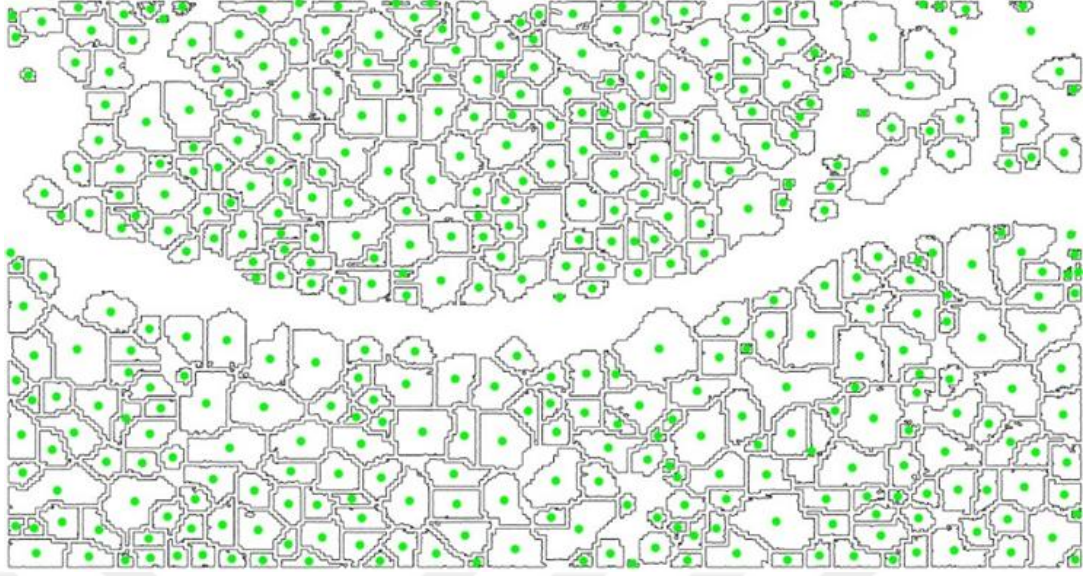
Kullanılan fonksiyonlar, Shoelace algoritmasından geometrik tekniklerden türetilmiştir, MATLAB yazılımında polyshape.centroid fonksiyonu ile ağırlık merkezi hesaplamalarında kullanılmıştır ((O'Rourke, 1998), (URL – 3)).

Her ağaç tacı için hesaplanan ' c ' ağırlık merkezi koordinat değerleri, bireysel olarak her ağaç ID'sine tayin edilerek '.shp' dosyasına kaydedilmiştir (Şekil 20).

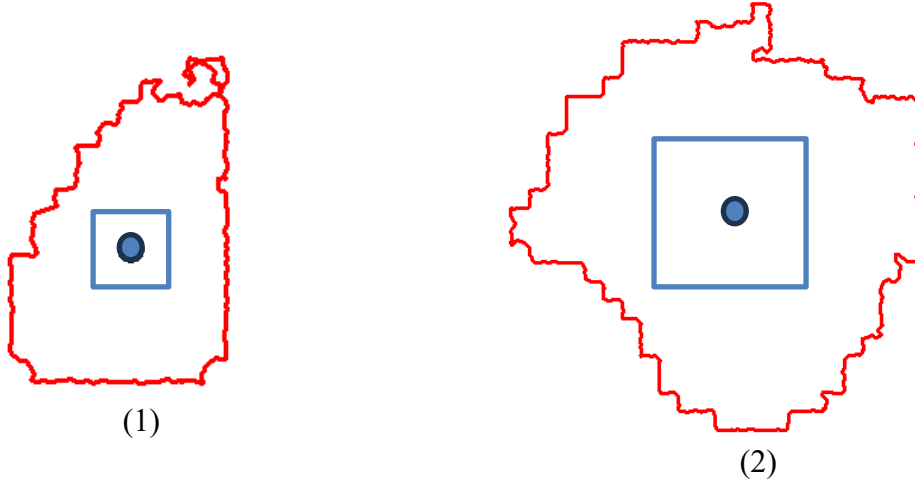


Şekil 20. Bireysel Ağaçların ağırlık merkezi ve sınırlarının gösterimi

Belirlenen ağırlık merkezleri, ROI (ilgi alanı) oluşturulmasında kullanılmıştır. Bulunan merkez noktalar ortofoto üzerinde tespit edilerek piksel koordinatları oluşturulmuştur. Bu adım, yapılan işlemin görselleştirilmesi, piksel koordinat sisteminde ifade edilmesi ve iş akışının sağlanması için önem arz etmektedir. Bireysel ağaç taç kümelerinin, piksel koordinat sisteminde ağırlık merkezleri tespit edilmiştir (Şekil 21). Oluşturulan ilgi pencereleri ROI merkezli olmak üzere kare pencereler oluşturularak piksel koordinat sisteminde her ağaca ayrı atamalar ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 22). Üretilen pencereler ve ağırlık merkezleri ‘.shp’ olarak kaydedilerek kullanımda süreklilik ve genel geçerlik sağlanmıştır.



Şekil 21. Piksel koordinat sisteminde ağırlık merkezi noktalarının gösterimi

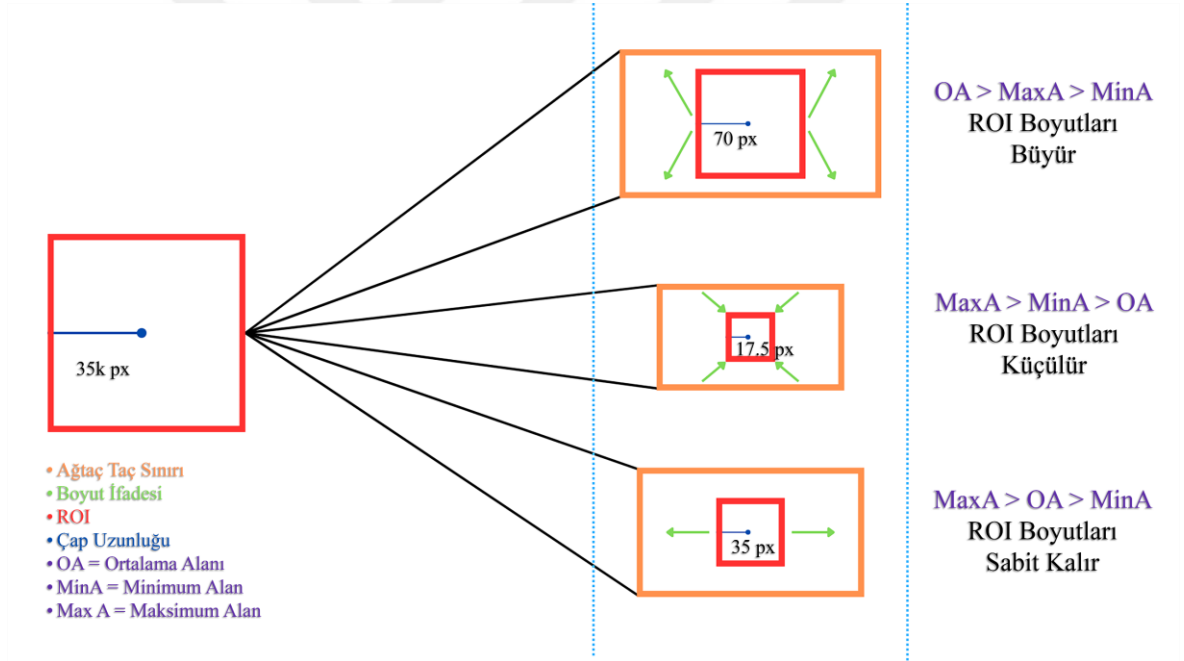


Şekil 22. 65 (1) ve 247 (2) numaralı ağaç taç ağırlık merkezlerine uygulanan ROI gösterimi

Ataması gerçekleştirilen ilgi alanı pencereleri her ağaç tacına göre aktif bir şekilde değişmekte ve kullanılan ağaç taç alan koşullandırma sistemine göre bireysel ağaç taçlarının alanlarına uyum sağlamaktadır. Böylelikle ağaç taç alanları ile ilgi alanı penceresi arasında doğru orantıda bir ilişki kurulması sağlanmıştır. Üretilen uyarlanabilir pencereler ile bireysel ağaç taç kümeleri indeks analizi için tekrar değerlendirilmiştir.

Kullanılan ilgi alanı pencerelerine ait piksel boyutları çalışma alanında bulunan ağaçların taç alanları incelenerek çeşitli denemeler sonucu oluşturulmuştur. Kullanılan ortofoto veri, hem yatay (X) hem dikey (Y) eksenlerinde 2.87 cm GSD (Yer Örneklem Aralığı)’ye sahiptir.

Çalışma alanını oluşturan sarıçam ağaçlarının taç genişliği, ortalama yaş ve sağlıklı çeşitli çalışmalar incelendiğinde 3 ila 7 (ortalama 5m) metre arasında yorumlanabilmektedir (Sporek ve Sporek, 2023), (Mäkinen ve Isomäki, 2004). Bu çap uzunluğu, gerçekleştirilen çalışmada 2,87cm/piksel GSD ile 104-244 piksel aralığında hesaplanmaktadır. Gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda mevcut çalışmada standart ROI yarıçapı 35px olarak belirlenmiştir. Belirlenen standart yarıçap, taç alanı bazlı oluşturulan katsayı ile her ağaç tacı için uyarlanabilir olarak çalışmaktadır (Şekil 23).



Şekil 23. Değişken koşullara Göre ROI durumları

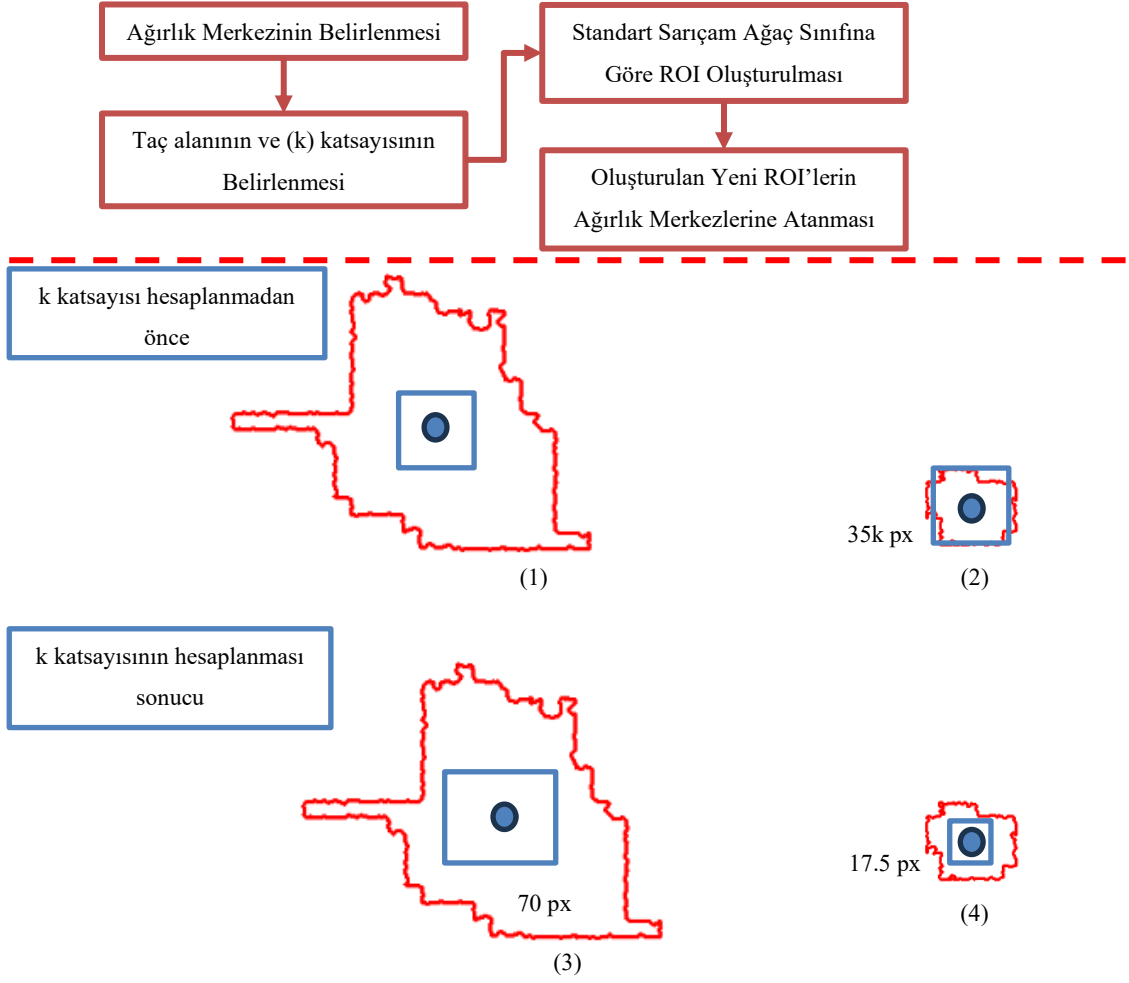
Gerçekleştirilen çalışmada tespit edilen her ağaç tacı için ayrı birer alan hesabı yapılmıştır. Yapılan alan hesapları Matlab yazılımında bulunan ‘polyarea’ fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fonksiyon temel olarak iki boyutlu birçok genin alanının hesaplanması için kullanılmaktadır. Alanı hesaplanacak çokgenin köşe koordinatları kullanılarak gerçekleştirilir yani ağaç taç sınırlarının poligon olarak çizdirildiği durumda belirlenen poligonun köşe koordinatlarından alan hesabı gerçekleştirilmiştir. Bu işlem

sırasında önemli etkenler biri, her kırılma noktasının koordinatlarının (X, Y) bilinmesi ve sıralı şekilde olması gerektirir. Koordinatların cinsine göre alan birimi sonucuna ulaşılmaktadır. Gerçekleştirilen hesaplamada taç sınır noktalarının koordinatları GSD ile çarpılması sonucu piksel biriminden metreye dönüşüm gerçekleştirilmiştir. Böylelikle nokta bulutundan tespit edilen sınır koordinatları ile iki aşamalı kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Tespit edilen ağaç taçlarının metrik sınıflandırılması, iki boyutlu bir düzlemde kendini kesmeyen bir alanın hesaplanmasını ‘gauss alan formülü’, ‘çokgen alanı için determinant formülü’ ile gerçekleştirilmiştir. Bu formül, çokgeni üçgen/paralelkenar parçalarına ayırarak toplam alanın hesaplanmasına dayanmaktadır. Düzlemde n kenarlı bir çokgenin alanı (A) hesaplanması aşağıda denklem 19’da gösterildiği gibi gerçekleştirilmektedir.

$$A = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^n (x_i \times y_{i+1} - x_{i+1} \times y_i) \right| \quad (26)$$

Bulunan her bir ağaç taç sınırlarına ait ağırlık merkezleri, taç alanları, ortalama sarıçam ağaçlarına ait taç alanları, ilgi alanı penceresi oluşturulurken kullanılan k katsayı parametresinin hesaplanmasında dikkate alınmıştır. Bunların sonucunda bir ilgi alanı penceresi oluşturulurken izlenilen iş akış adımları Şekil 24’ te gösterilmiştir.

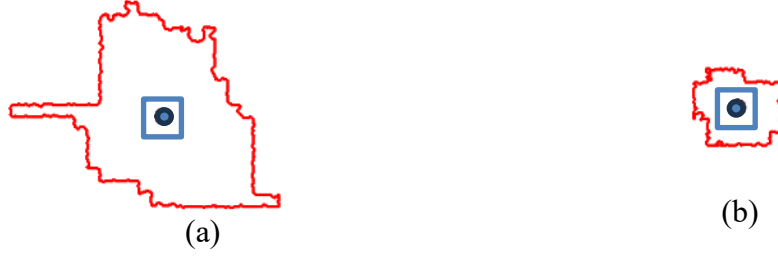


Şekil 24. Örnek 324(2,4) ve 162(1,3) no'lu ağaç taçlarına İlgi alanı penceresi atanmasında izlenen iş akışı

2.8. Taç Merkezi Bazlı İndis Uygulaması

Yapılan işlemlerde MATLAB yazılımında 'centroid' fonksiyonu kullanılarak 2 boyutta geometrik ağaç taç sınırlarına ait ağırlık merkezleri tespit edilmiştir. Tespit edilen ağaç taç sınırları, taç bazlı spektral analiz çalışmasının başlangıçlarını oluştururken taç merkezine bağlı ROI bazlı analiz çalışmasında spektral analiz çalışmasının başlangıcı her bireysel taç için atanan taç merkezine bağlı ilgi alanı olmaktadır. İlgi alanı içinde kalan piksellere ait koordinatlar tespit edilerek ilgili piksel spektral özellikleri kaydedilir. Piksellerin kaydedilmiş olması aynı veri üzerinde farklı spektral çalışmalarda yapılmasını olanaklı hale getirmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan iki farklı indeks, ilgi alanında belirlenen piksellere ait spektral nitelikler ile kullanılmıştır.

Sunulan bu yöntemde öncekinden farklı olarak ağırlık merkezine bağlı, çalışma alanında bulunan ağaç taç büyüklüklerine göre ayarlanmış standart bir ilgi alanı penceresinde (Şekil 25) spektral analiz gerçekleştirilmiştir.



Şekil 25. 162 (a) ve 324 (b) nolu ağaç taç ağırlık merkezlerine uygulanan ROI gösterimi

2.9. Nesne Tabanlı Doğruluk Analizi

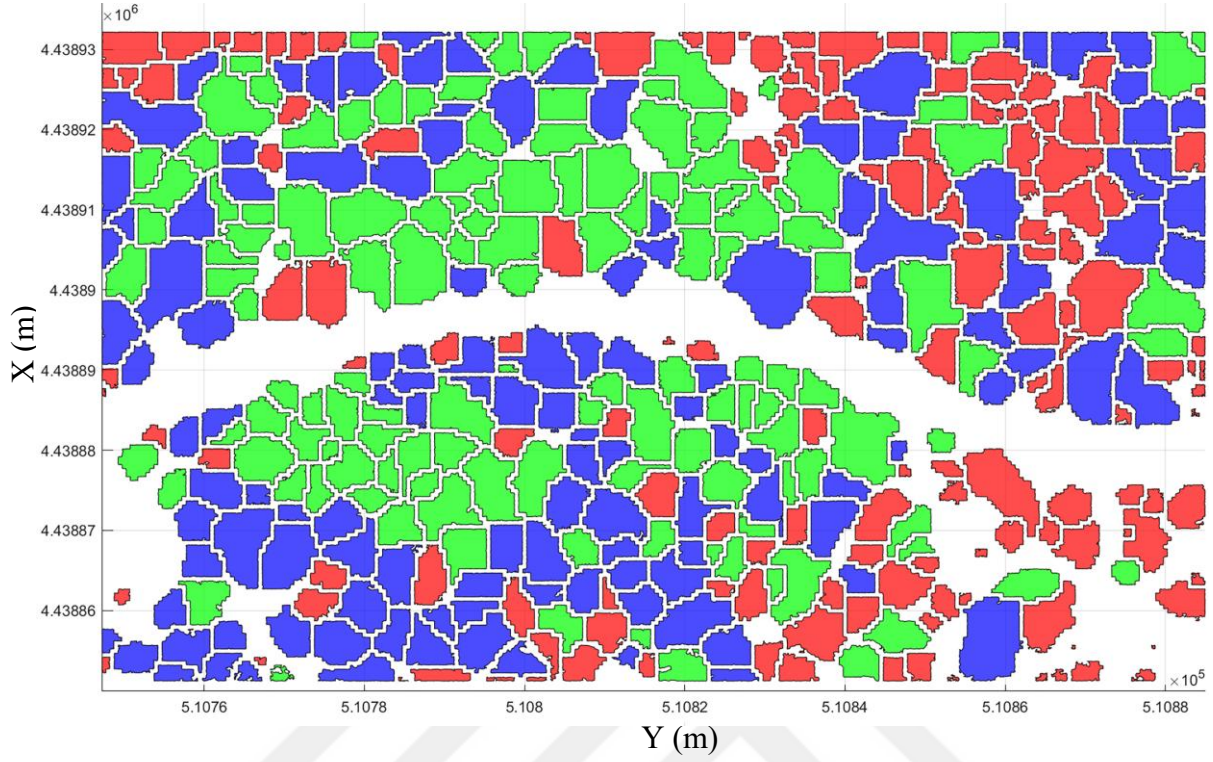
Tez kapsamında önerilen bireysel ağaç sınıflandırma tekniğinin doğruluğunun değerlendirilmesi amacıyla, nesne tabanlı doğruluk değerlendirme yöntemi kullanılmıştır. Ağaç taç sınırlarını için referans veya gerçek (ground truth) veri bulunmamasından ötürü, piksel tabanlı doğruluk değerlendirmesi uygun görülmemiş bunun yerine nesne tabanlı bir analiz uygulanmıştır. Doğruluk değerlendirmesi amacıyla, referans verisinin operatör destekli üretilen sınıflandırma sonuçları ile karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. Nesne tabanlı doğruluk analizinde Doğru Pozitifler (DP), Yanlış Pozitifler (YP) ve Yanlış Negatifler (YN) metrikleri kullanılmıştır. Doğru Pozitifler, doğru şekilde tespit edilen ağaç taç sınıflandırmasını ifade ederken; Yanlış Pozitifler, sınıflandırma sonucunda ifade edilen lakin gerçekte bulunmayan taç sınıfını (komisyon hatası) belirtmektedir. Yanlış Negatifler ise sahada bulunan ve sınıflandırma sonucunda yanlış ifade edilen ağaç sınıfını (ihmal hatası) temsil etmektedir. Doğru Negatifler, negatif olan bir durumun sınıflandırma sonucunda negatif olarak tespit edilmesidir.

Yapılan sınıflandırmada, referans ağaç taç sınıfları ile eşleştirilebilen sınıflandırma sonucu ağaç taçları Doğru Pozitif olarak sınıflandırılmış; eşleştirilemeyen sınıflandırma sonucu ağaç taçları sırasıyla, Yanlış Pozitif ve Yanlış Negatif olarak değerlendirilmiştir.

Nesne tabanlı doğruluk değerlendirmesinde; Tamlik (Cp-Completeness), Doğruluk (Cr- Correctness), Kalite (Q- Quality) ve F1-skoru metrikleri kullanılmıştır.

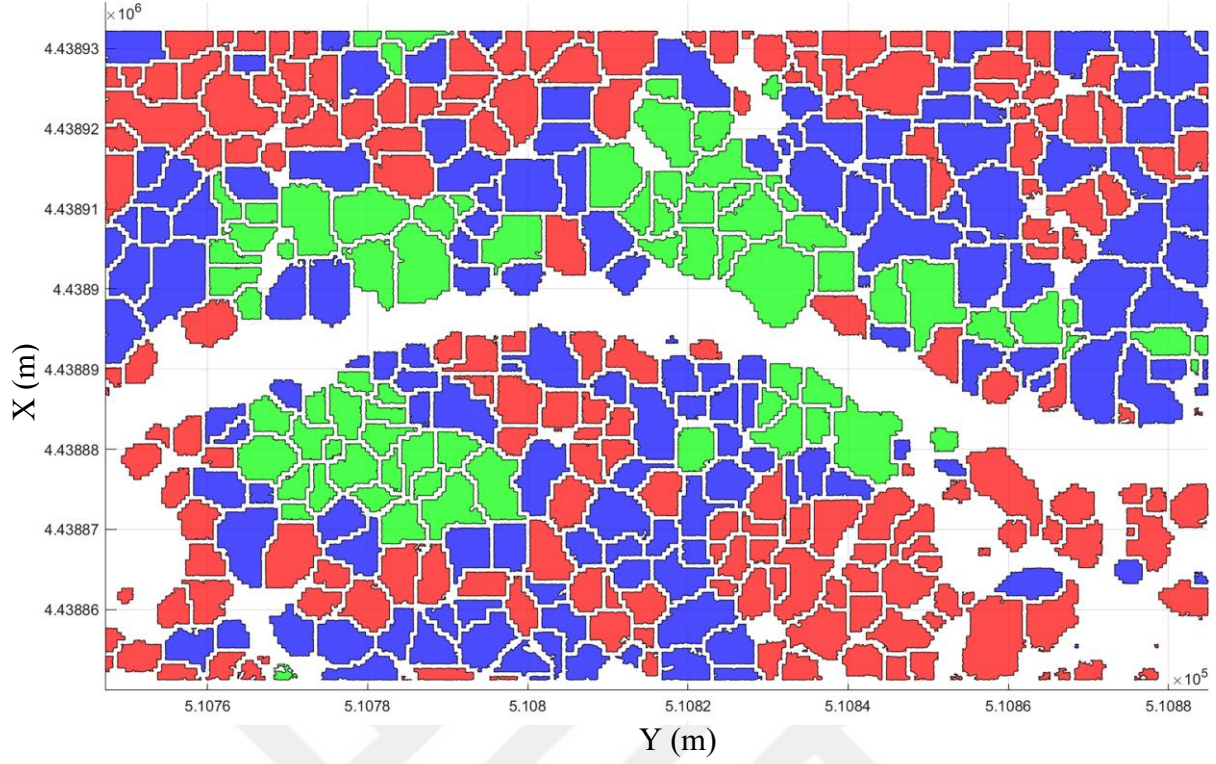
3. BULGULAR

Çalışma kapsamında LiDAR ve çok bantlı görüntüler birlikte kullanılmıştır. Çeşitli veriler kullanılarak çok adımlı bir sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Uygulama aşamasında yer ve yer üstü noktaların LiDAR nokta bulutunda ayrılması için SMRF algoritması kullanılmıştır. Elde edilen yer üstü noktalarından sarıçam ağaç taçlarının segmentasyonu için, parametreler ayarlanarak Kanopi Yükseklik Modeli (KYM) ve havza bölütleme (Watershed Segmentation) algoritması kullanılmıştır. Tespit edilen ağaç taçları için alan ve çevre hesaplamaları ayrı birer 'shapefile' dosyasına kaydedilerek nicel veriler ve koordinat verilerinin kaydı LiDAR nokta bulutundan elde edilmiştir. Elde edilen koordinat verileri ortofoto görüntü ile aynı düzlem üzerinde çakıştırılarak çevre sınırlarının görüntü düzleminde temsili gerçekleştirilmiştir. Aynı düzleme yansıtılması ile tüm ağaç taçlarının içinde kalan piksellere ait yansıma değerleri ile koordinat değerleri eşleştirilerek spektral analizlerin konumsal veriyle birlikte gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Her bir ağaç tacı için, piksel düzleminde aritmetik işlemler gerçekleştirilmiş; her satırdaki tüm pikseller taranarak spektral özellikler sistematik bir biçimde kaydedilmiştir. Tüm verinin yansıma ve konumsal niceliklerinin kaydedilmesi, çeşitli spektral analizler için referanslı çalışmalara uyum sağlayabilecek şekilde olanaklı hale getirmiştir. Oluşturulan ağaç taç sınırları, ortofoto ve LiDAR nokta bulutu verileri birlikte kullanılarak operatör yardımıyla sınıflandırılmış doğrulama verisi üretilmiştir (Şekil 23). Çalışma alanı için hesaplanan referans verileri, her ağaç taç sınırı için ayrı olarak etiketlenmiş ve her sınıf için tespit edilmesi gereken sınıf yüzdeleri belirlenerek etiketler operatör yardımıyla atanmıştır.

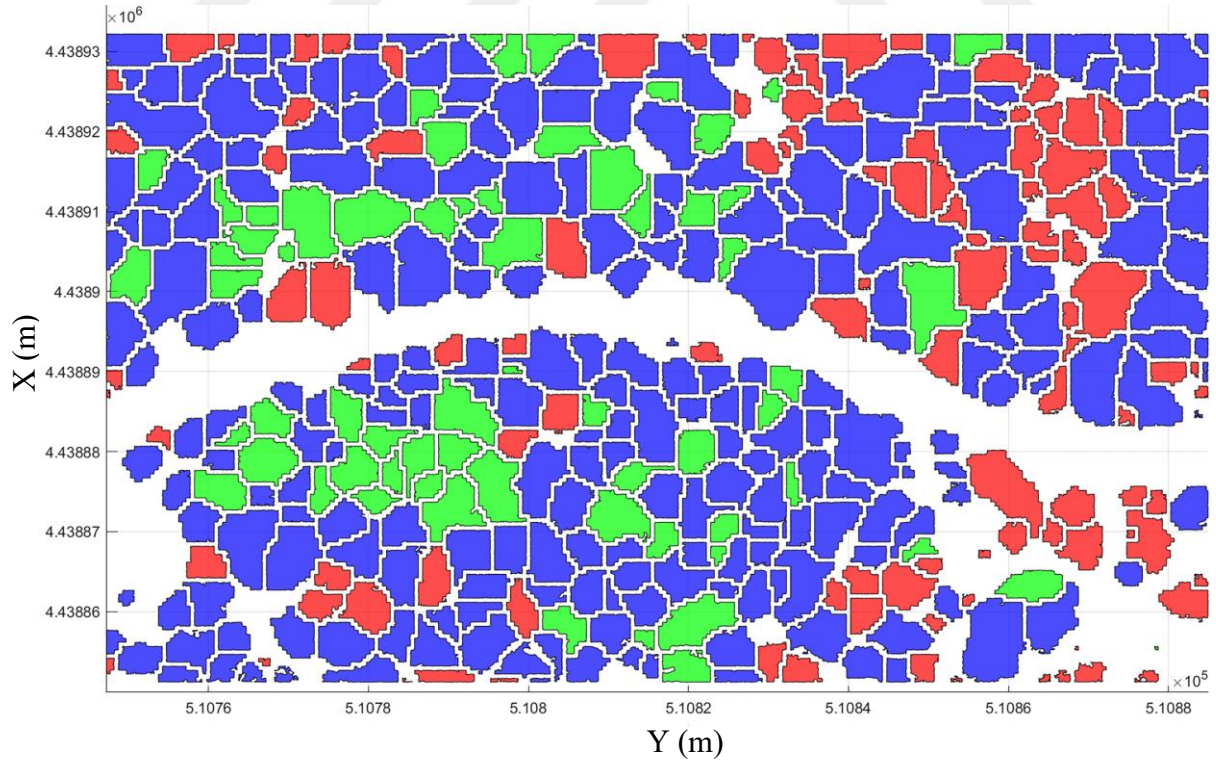


Şekil 26. Operatör Destekli Sınıflandırılmış Veri (Kırmızı Sağlıksız, Mavi Yarı sağlıklı, Yeşil Sağlıklı Sınıfı Temsil Eder)

Gerçekleştirilen çalışmada ağaç sağlıklarının yorumlanabilmesi için iki çeşit spektral analiz gerçekleştirilmiştir. Klorofil düzeyi belirlenmesi ve ağaç stresinin izlenebilmesi için NDRE ve NDVI analizleri taç sınırlarıyla elde edilen piksel verilerine uygulanmıştır (Şekil 27 ve Şekil 28).



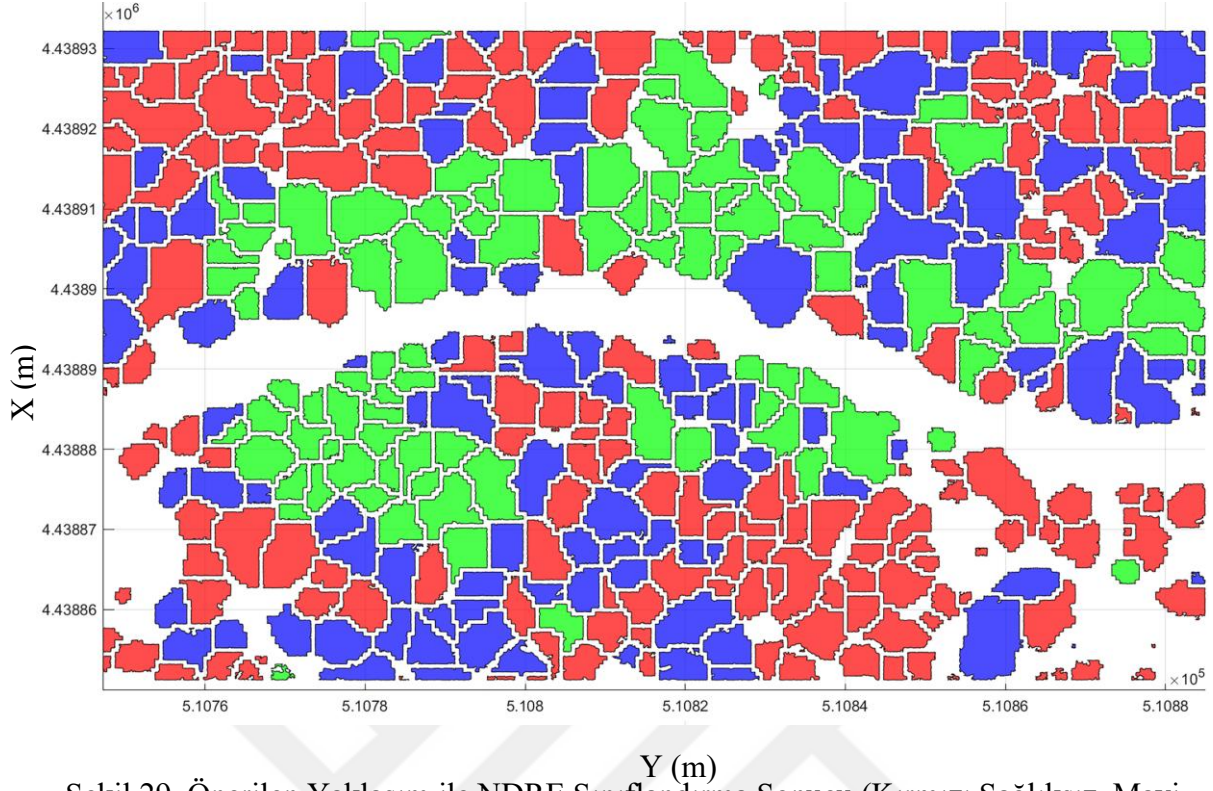
Şekil 27. Ağaç Taç Sınırlarına Uygulanan NDRE Sınıflandırma Sonuçları (Kırmızı Sağlıksız, Mavi Yarı sağlıklı, Yeşil Sağlıklı)



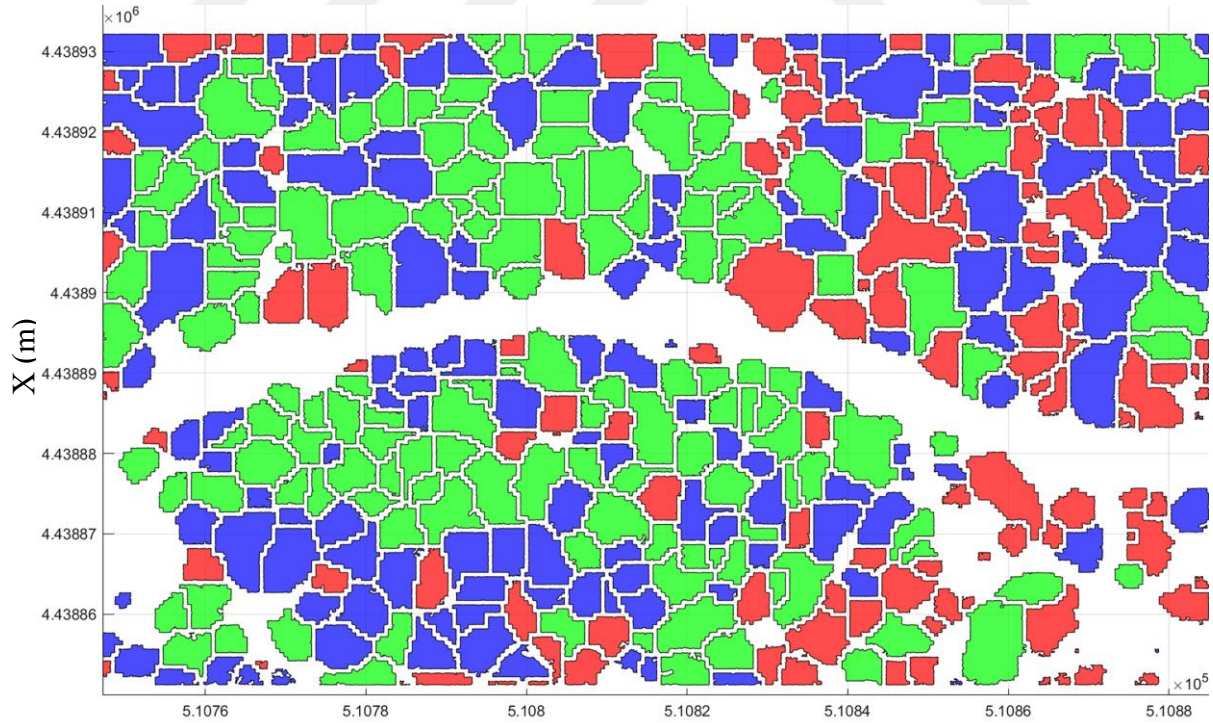
Şekil 28. Ağaç Taç Sınırlarına Uygulanan NDVI Sınıflandırma Sonuçları (Kırmızı Sağlıksız, Mavi Yarı Sağlıklı, Yeşil Sağlıklı)

Ağaç taç merkezlerine atanan ağaç taçlarına uyarlanarak her ağaç tacı için değişiklik gösterebilen ilgi alanı pencereleri, yapılacak uygulamaların belirli çerçeveler içerisinde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Bu durum sayesinde çalışma alanı, ağaç taçlarından daha alt bir küme olan ağaç merkezinin etrafına atanmış ilgi alanı penceresi olmaktadır. Her ağaç taç sınırı çalışma alanı ağaç taç nicelik verileri ile sarıçam ağaç türü için belirlenen standart nicelikler karşılaştırılarak her taç için uyarlanabilen ilgi alanı pencereleri (ROI) tasarlanmıştır. Oluşturulan ROI'ler her ağaç için ayrı birer referans noktasına atanarak gerçekleştirilmiştir. Referans noktalar her ağaç tacının merkezi olarak alınmıştır.

Sarıçam ormanından oluşan çalışma alanı için çap uzunluğu ve alan büyüklüğü göz önüne alınarak 35×35 piksel boyutlarında ilgi alanı penceresi standart olarak belirlenmiştir. Belirlenen standart pencere ile iki çeşit uygulama yapılmıştır. İlk uygulamada her analiz için standart ilgi alanı penceresi ölçüleri sırasıyla 35×35, 15×15, 10×10 piksel boyutlarında ağaç taç boyutlarına uyarlanabilir şekilde kullanılarak eşik değeri ile gerçekleştirilen spektral analizdir. İkinci uygulama, ilgi alanı penceresi boyutları her analiz için sırasıyla 35×35, 15×15, 10×10 piksel boyutlarının ağaç taç merkezine sabit (herhangi bir uyarlanma olmadan) olarak, eşik değeriyle gerçekleştirilen spektral analizdir. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda en yüksek doğruluk standart 35×35 piksel boyutlarında ağaç taç boyutlarına uyarlanabilen ilgi alanı pencereleri ile yapılan spektral analiz sonuçları ile elde edilmiştir. Yapılan sınıflandırmayla elde edilen ağaç taç sınırlarına ve 35×35 piksel boyutlarında uyarlanabilir ilgi alanı pencerelerine ait sınıflandırma sonuçları Şekil 29 ve Şekil 30'da sunulmuştur.

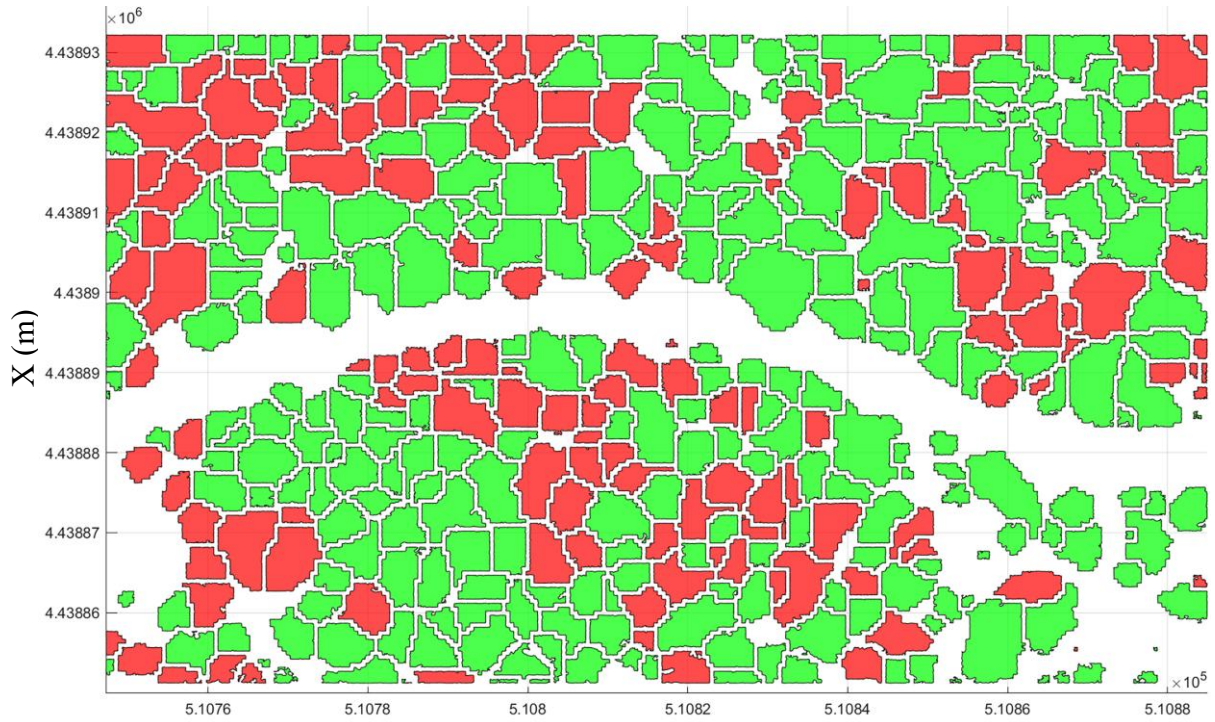


Şekil 29. Önerilen Yaklaşım ile NDRE Sınıflandırma Sonucu (Kırmızı Sağıksız, Mavi Yarı Sağlıklı, Yeşil Sağlıklı)

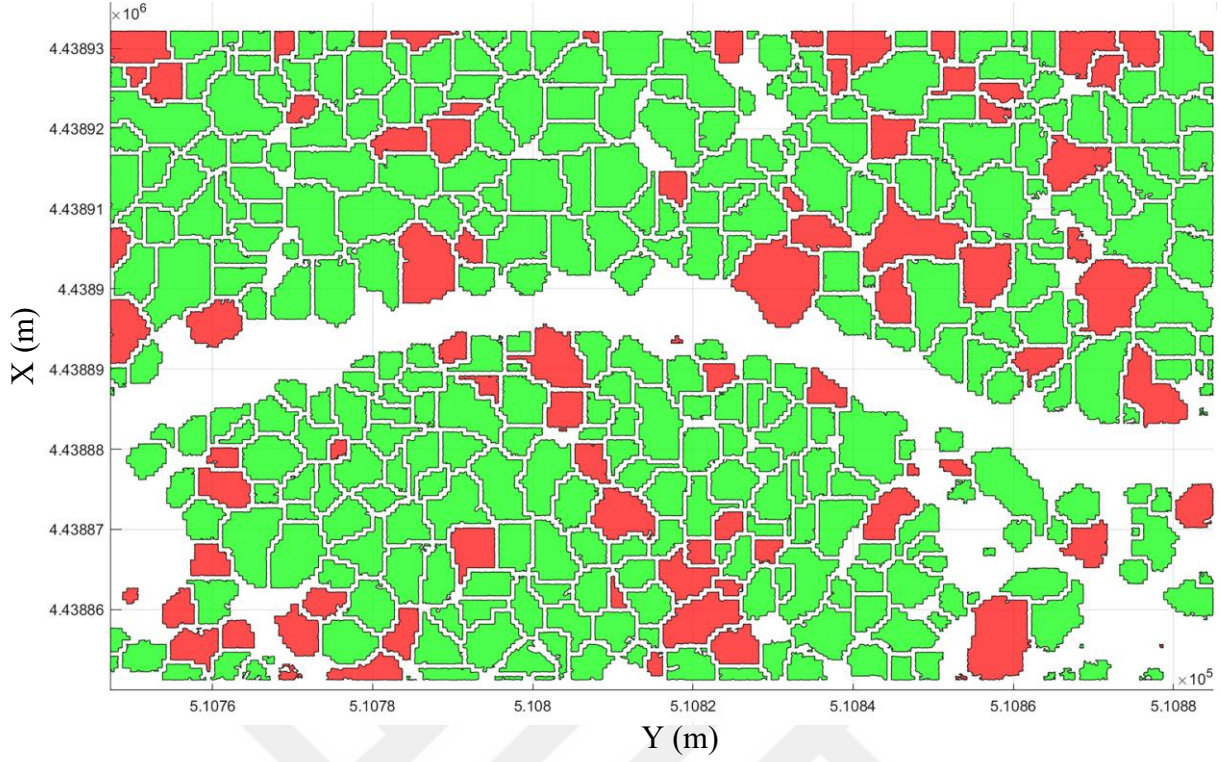


Şekil 30. Önerilen Yaklaşım ile NDVI Sınıflandırma Sonucu (Kırmızı Sağıksız, Mavi Yarı Sağlıklı, Yeşil Sağlıklı)

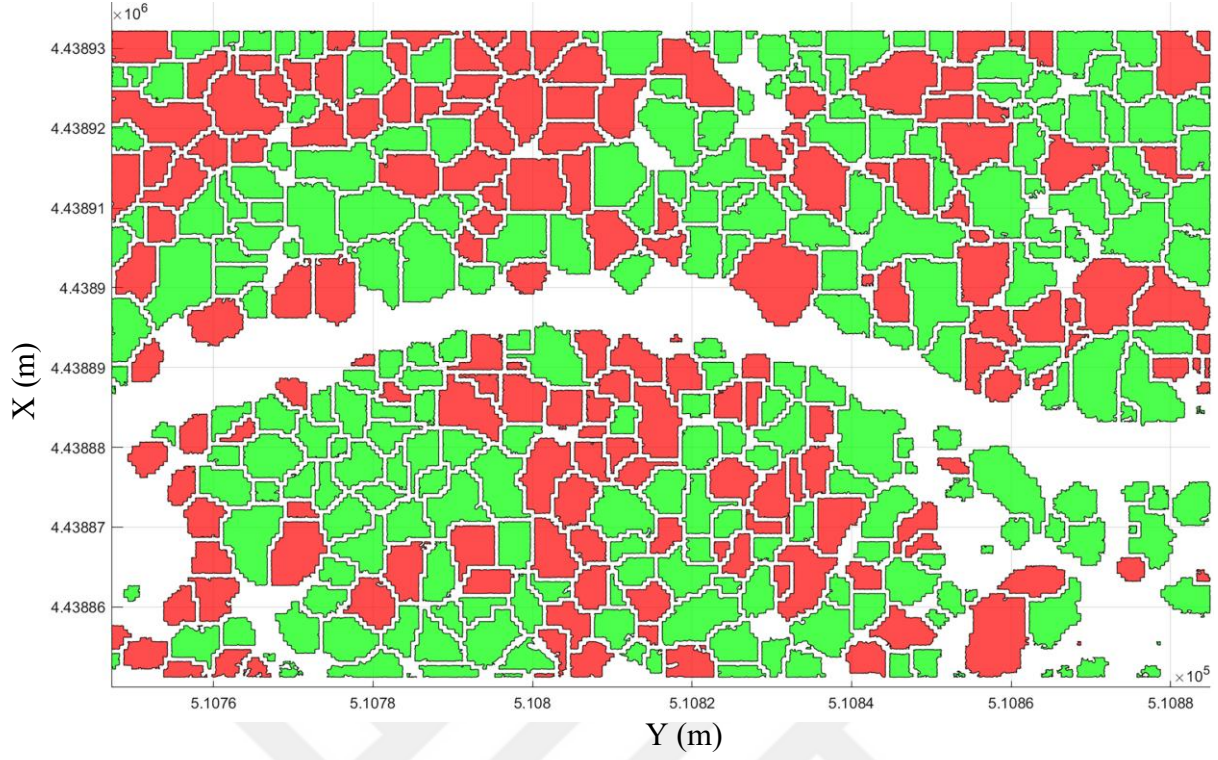
Gerçekleştirilen sınıflandırma sonucunda elde edilen sonuçlar her ağaç için bireysel taçlara yüzdesel olarak kaydedilmiştir. Ayrıca üretilen etiket verileri, operatör yardımıyla oluşturulan referans verileriyle kıyaslanarak tahmin doğruluğuna yönelik haritalar üretilmiştir. Uyarlanabilir 35×35 ROI bazlı sınıflandırma değerlendirme haritası ile ağaç taçlarına doğrudan uygulanan indeks analizinin değerlendirilmesine yönelik karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 31, 32, 33 ve 34’te sunulmuştur.



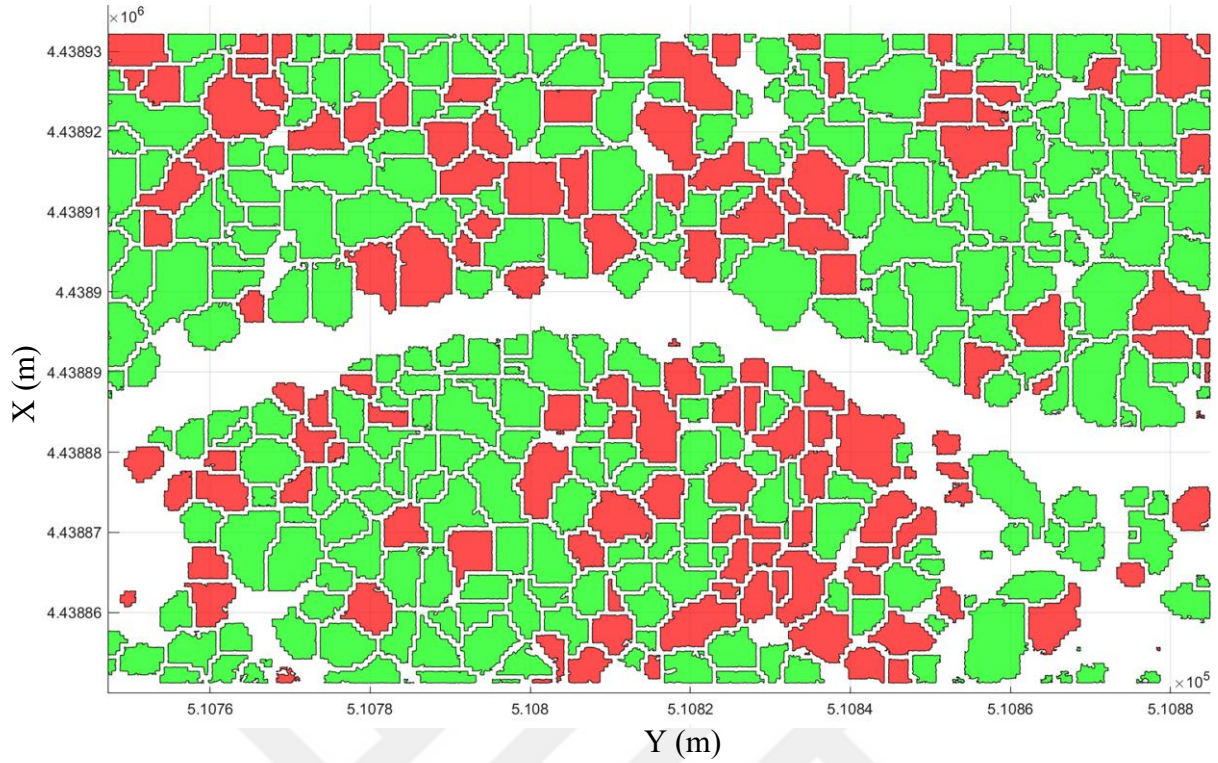
Şekil 31. Önerilen Yöntem Kullanılarak Üretilen NDRE Sınıflandırma Haritasının Doğrulama Verisi ile Çakıştırılması Sonucu Elde Edilen Harita (Yeşil Uyuşan, Kırmızı Farklı Sonuçları İfade Eder)



Şekil 32. Önerilen yöntem kullanılarak üretilen NDVI sınıflandırma haritasının doğrulama Verisi ile Çakıştırılması Sonucu Elde Edilen Harita (Yeşil Uyuşan, Kırmızı Farklı Sonuçları İfade Eder)



Şekil 33. Ağaç Taç Sınırları Kullanılarak Üretilen NDRE Sınıflandırma Haritasının Doğrulama Verisi ile Çakıştırılması Sonucu Elde Edilen Harita (Yeşil Uyuşan, Kırmızı Farklı Sonuçları İfade Eder)



Şekil 34. Ağaç Taç Sınırları Kullanılarak Üretilen NDVI Sınıflandırma Haritasının Doğrulama Verisi ile Çakıştırılması Sonucu Elde Edilen Harita, (Yeşil Uyuşan, Kırmızı Farklı Sonuçları İfade Eder)

Operatör yardımcı etiketleme ile oluşturulan etiketlenmiş referans verisi, uygulanan eşikli analiz çalışması sonrası üretilen etiketli veri ile çakıştırılarak çalışma alanı için yapılan etiketleme çalışması sunulmuştur. Şekil 31, 32, 33 ve 34'te sunulan haritalarda yeşil renk ile belirtilen ağaç taçları hem referans verisinde hem de analiz sonucunda aynı sınıfta etiketlenmiş veriler olmaktadır. Kırmızı renk ile belirtilen ağaç taçları, referans verisi ile analiz sonucunda farklı sınıflarda etiketlenmiş veriler olmaktadır. Yapılan çakıştırma işlem sonuçları, her ağaç tacına ataması yapılarak her analiz sonucu elde edilen sonuçlara ait haritalar elde edilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışma kapsamında, iki farklı spektral indeks kullanılarak, belirlenen eşik değerleriyle ağaç taçları üç sınıfta incelenmiştir. Yapılan bu sınıflandırma sonucunda, her iki spektral indeks temel alınarak eşik değerleriyle çalışma alanındaki ağaç taçları üzerinden ağaçların sağlık durumları etiketlenmiştir. İşlemler sonucunda atanan etiketler, çalışmanın değerlendirilmesi aşamasında nesne bazlı değerlendirmede kullanılmıştır.

Yapılan doğruluk çalışmasında, gerçekleştirilen her analiz için referans verisi ile yeniden çakıştırma gerçekleştirilmiştir. Referans verisi, operatör yardımıyla ortofoto ve

nokta bulutu değerlendirmelerine dayanarak etiketlenen ağaç taçlarından oluşmaktadır. Ağaç taçları eşikleme metoduyla 3 sınıfla ve 2 sınıfla değerlendirilerek etiketlenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğruluk metrikleri ile yorumlanarak aşağıdaki tablolarda sunulmuştur.

Tablo 5. Standart 35×35 Piksel Boyutları Kullanılarak Uyarlanabilir İlgi Alanı Penceresiyle 3 Sınıflı Kontrol

Önerilen Yöntem Kullanılarak Yapılan Analiz ile Doğrudan Ağaç Taçlarına Yapılan Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması												
NDVI							NDRE					
Doğrudan Ağaç Taçlarına			Önerilen Yöntem				Doğrudan Ağaç Taçlarına			Önerilen Yöntem		
Sınıf1	Sınıf2	Sınıf3	Sınıf1	Sınıf2	Sınıf3		Sınıf1	Sınıf2	Sınıf3	Sınıf1	Sınıf2	Sınıf3
58	75	0	122	11	0	1	61	47	25	80	28	25
4	120	4	24	95	9	2	8	71	49	13	71	44
2	47	103	0	37	115	3	8	30	114	8	27	117

Gerçekleştirilen çalışmada doğrudan ağaç taçlarına uygulanan spektral indeks analiz çalışmasına ait karışıklık matrisi tablo 5'te sunulmuştur. Sunulan karışıklık matrisi çalışmanın tahmin performansının değerlendirilmesi için önem arz etmektedir. Renklendirilmiş köşegen veriler analiz çalışması sonucunda True Pozitif (TP) olarak değerlendirilen ağaç sayısını ifade etmektedir.

Tablo 5'te sunulan NDVI SHP sütunu; ağaç taç sınırları kullanılarak doğrudan ağaç taç alanlarında gerçekleştirilen indeks analizine ait karışıklık matris sonuçlarını içermektedir. Sunulan karışıklık matrisi incelendiğinde gerçekleştirilen analiz çalışması sonucunda TP olarak ifade edilen değerler sırasıyla; sınıf1 için 58, sınıf2 için 120, sınıf3 için 103 toplamda 281 doğru değerlendirilen ağaç olduğu görülmektedir. Sınıf1 için 6 adet, sınıf2 ve sınıf3 iken tahmin edilen ağaç bulunmaktadır, bu değerler False Pozitif (FP) olarak tanımlanmaktadır. Sınıf1 iken, sınıf2 ve sınıf3 olarak tanımlanan 75 adet ağaç False Negatif (FN) olarak değerlendirilmiştir. True Negatif (TN) olarak tahmin edilen değerleri sınıf1 dışında tahmin edilen değerler oluşturmaktadır. Bunlar $120 + 4 + 47 + 103 = 274$ şeklinde de ifade edilebilmektedir. Karışıklık matrisi sınıf2 için incelendiğinde TP olarak tanımlanan 120 ağaç olduğu görülmektedir. FP olarak, sınıf1'e ait 75, sınıf3'e ait 47, toplamda 122 ağaç

tespit edilmektedir. FN olarak, analiz sonucu yanlış atanan sınıf1'e ait 4 ve sınıf3'e ait 4 ağaç, toplamda 8 ağaç bulunmuştur. Sınıf2 dışında bulunan doğru tahminler incelendiğinde toplamda $58+0+2+103 = 163$ ağaç bulunmuştur. Sınıf 3 için karışıklık matrisi değerleri incelendiğinde TP değeri 103 olduğu görülmektedir. FP değeri, sınıf1 olarak değerlendirilen 0 ve sınıf2 olarak değerlendirilen 4 ağaç toplamda 4 olarak hesaplanmaktadır. FN olarak değerlendirilen toplam 49 ağaç bulunmaktadır, bunlardan 2 adet ağaç sınıf1 47 adet ağaç ise sınıf2 olarak atanmıştır. TN değerinin hesaplanması için sınıf3 dışında kalan değerler toplanması gerekmektedir. Sonuç, $58+75+4+120=257$ olarak hesaplanmaktadır.

Gerçekleştirilen çalışmada doğrudan ağaç taç alanlarına gerçekleştirilen NDVI analizi sonucunda yapılan sınıflandırma, referans etiketli veri temel alınarak değerlendirilmiştir. Her bir sınıf için elde edilen doğruluk metrikleri aşağıda özetlenmektedir:

Doğruluk (Precision), sınıf1 için %90,6, sınıf2 için %49,6 ve sınıf3 için %96,3 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar sınıf1 ve sınıf3 için yüksek oranda pozitif olarak tahmin edilen örnek sayısının doğru sınıflandırıldığını ifade etmektedir.

Tamlık (Recall), sınıf1 için %43,6, sınıf2 için %93,8 ve sınıf3 için %67,8 olarak belirlenmiştir. Bu durum sınıf2 için pozitif örneklerin büyük oranda tespit edildiğini lakin sınıf1 için eksik sınıflandırma yapıldığını göstermektedir.

Kalite (jaccard İndeksi), sınıf1 için %41,7, sınıf2 için %48,0 ve sınıf3 için %66,0 olarak elde edilmiştir.

F1-Skoru, sınıf1 için %58,9 sınıf2 için %64,9 ve sınıf3 için %79,5 olarak hesaplanmıştır. Bulunan bu sonuçlar doğruluk ve tamlık ölçütlerinin harmonik ortalaması olmaktadır ve sınıflar arasındaki dengenin değerlendirilmesini sağlamaktadır. Sonuçlar incelendiğinde sınıf3'ün daha dengeli ve başarılı bir sınıflandırma performansı gösterdiği görülmektedir.

Tüm sınıflar dikkate alınarak incelendiğinde sonuçlar:

Ortalama Doğruluk: %78,8

Ortalama Tamlık: %68,4

Ortalama Kalite: %51,9

Ortalama F1-Skoru: %67,8

olarak bulunmuştur.

Analiz çalışmasında, NDRE spektral indeksi içinde ağaç taç sınırları baz alınarak ağaç alanında işlem gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırma sonuçları NDVI analizinde gerçekleştirildiği gibi etiketli referans verisi ile karşılaştırılarak tespit sonuçları

değerlendirilmiştir. Sınıflandırma sonuçları karışıklık matrisinde (tablo 7) sunulmuştur. Üç sınıfa ait sınıflandırma performansı, temel doğruluk metrikleriyle aşağıda yorumlanmıştır:

Doğruluk (Correctness / Precision), sınıf1 için %79,2, sınıf2 için %47,9, sınıf3 için %60,6 bulunmuştur. İfade edilen değerler incelendiğinde sınıf1 için yüksek düzeyde doğru pozitif tahmin yapıldığını sunmaktadır. Sınıf2 ve sınıf3 için ise yapılan analiz düşük doğrulukta sınıflandırmalar gerçekleştirmiştir. Hesaplanan ortalama doğruluk %62,2 olmaktadır.

Tamlık (Recall / Completeness), sınıf1 için %45,9, sınıf2 için %55,5, sınıf3 için %75,0 olarak bulunmuştur. Hesaplanan sonuçlar incelendiğinde sınıf3 için yüksek oranda doğru pozitif sınıflandırma gerçekleştirdiği görülmektedir. Sınıf1 ve sınıf2 için ise önemli ölçüde eksik sınıflandırma yapıldığı görülmektedir. Ortalama tamlık değeri %58,8'dir.

Kalite (Jaccard İndeksi / Intersection OverUnion), sınıf1 için %40,9, sınıf2 için %34,6, sınıf3 için %50,4 olarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplama sonucunda bulunan değerler, sınıflandırma kalitesinin daha bütüncül bir şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Değerlendirilen sınıflar incelendiğinde en yüksek kalite sınıf3'te gözlemlenebilirken, en düşük kalite değeri sınıf2'de görülmektedir. Ortalama kalite değeri %42 olmaktadır.

F1-Skoru, sınıf1 için %58,1, sınıf2 için %51,4, sınıf3 için %67,1 olmaktadır. F1-Skoru doğruluk ve tamlık doğruluk metriklerini kullanarak bir doğruluk sunar. Sınıf3, diğer sınıflar ile kıyaslandığında, sınıflandırma sonucu daha başarılı ve dengeli olduğu görülmektedir. Hesaplanan ortalama F1-Skoru %58,9 olmaktadır.

Çalışmanın ana amacını oluşturan, ağaç taç merkezi referanslı uyarlanabilir standart $m \times m$ piksel boyutundaki ilgi alanı pencereleri, çalışma alanı olarak kullanılacak verileri analiz çalışmasında kullanılan en küçük veri kümesi olacak şekilde yeniden oluşturulabilmesine olanak sağlamaktadır. Tablo5'te ifade edilen, 35×35 piksel boyutundaki uyarlanabilir ilgi alanı penceresi ile gerçekleştirilen spektral analizler, çalışma alanını ağaç taç alanın daha odaklı bir kısmına doğrudan yönlendirmektedir. İki spektral analiz çalışması (NDVI ve NDRE) için uyarlanabilir ilgi alanı pencereleri kullanılarak değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme aşaması, doğrudan ağaç alanı kullanılarak yapılan analizlerde olduğu gibi operatör destekli oluşturulan sınıflandırma sonuçları ile karşılaştırılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirme sonucunda elde edilen sınıflandırma sonuçları tablo 5'te sunulmuştur. Uyarlanabilir ilgi alanı penceresi ile gerçekleştirilen NDVI ve NDRE eşik değerli spektral indeksleri ile yapılan sınıflandırma işlemlerine ait karışıklık matrisi ve

doğruluk metriklerinin analizi yapılmış; ulaşılan sonuçlar aşağıda ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

NDVI kullanılarak eşik değeri işlemi sonrası yapılan sınıflandırma doğruluğu için karışıklık matrisi incelenmiştir. Sınıf1 için TP olarak değerlendirilen ağaç sayısı 122, FP olarak değerlendirilen ağaç sayısı 24, FN olarak değerlendirilen ağaç sayısı 11 olmaktadır. Bu sonuçlar incelendiğinde uyarlanabilir ilgi alanı penceresi kullanılarak gerçekleştirilen NDVI işleminde sadece 11 örnek başka sınıfa atanmıştır. Sınıf2 için karışıklık matrisi incelendiğinde sınıf1 ve sınıf3 olarak ağaçların çoğunlukla sınıflandırıldığı görülmektedir. Toplamda 33 ağaç sınıf1 ve sınıf3 olarak sınıflandırılmıştır, bunlardan 24'ü sınıf1, 9'u ise sınıf3'tür. 95 Ağaç sınıf2 olarak sınıflandırılmıştır. Sınıf3 için yapılan sınıflandırma sonuçları incelendiğinde 115 doğru tahminin yapıldığı, 37 ağacın ise sınıf2 olarak değerlendirildiği görülmektedir.

Eşik değeri kullanılarak gerçekleştirilen NDRE indeks analiziyle yapılan sınıflandırma sonuçlarına tablo5'teki karışıklık matrisinde verilmiştir. Sınıflandırma sonuçları incelendiğinde sınıf1 için gerçek pozitif 80 ağaca karşılık yanlış sınıflandırılan 53 ağacın (28 sınıf2 ve 25 sınıf3) olduğu görülmektedir. Sınıf2 incelendiğinde ise gerçek pozitif olarak nitelendirilen 71 ağaca karşılık, sınıflandırma sonucu sınıf2 olması gereken 44 ağaç sınıf3 olarak tayin edilmiştir. 117 ağaç gerçek pozitif olarak sınıf3 için tahmin edilmesine rağmen 35 ağaç diğer sınıflarda tahmin edilmiştir (8 ağaç sınıf1 ve 27 ağaç sınıf3).

Karışıklık matrisinin incelenmesi sonucunda sınıf bazında doğruluk değerlendirmeleri her iki indeks çalışması sonucunda yapılan sınıflandırmalar için gerçekleştirilmiştir. Her sınıf için tayin edilen ağaç doğrulukları, operatör yardımıyla üretilen referans veriyle doğrudan ağaç taç alanına yapılan doğruluk analizinde olduğu gibi değerlendirilmiştir. Her sınıf için hesaplanan doğruluk metrikleri ve ulaşılan sonuçların değerlendirilmesi aşağıda yapılmıştır.

Her iki indeks çalışması içinde sınıflandırma çalışması 3 aşamalı olarak sınıf1, sınıf2 ve sınıf3 olarak gerçekleştirilmiştir. NDVI analizi sonucunda sınıf1 olarak değerlendirilen ağaçlar neredeyse eksiksiz, çok doğru şekilde tespit edilmiştir. Hesaplanan doğruluk metrikleri; precision 0,83, recall 0,91, F1-Skoru 0,87 olmaktadır. Yine sınıf1 için NDRE analizi sonucunda yapılan değerlendirme incelendiğinde hesaplanan doğruluk oranları; precision 0,79, recall 0,60, F1-Skoru 0,69 olmaktadır. Sınıf2 için NDVI ve NDRE indeksleri için analiz sonuçları değerlendirildiğinde F1-Skoru metrikleri sırasıyla 0,70 ve 0,55 olmaktadır. NDRE analiz sonucu için doğruluk metrik sonucu dikkate alındığında ve

karışıklık matrisi incelendiğinde sınıf2 için hem sınıf1 hemde sınıf3 ile yüksek bir karışıklığın olduğu görülebilmektedir. Her iki yöntem içinde sınıf2 için yapılan sınıflandırmanın zayıf olduğu doğruluk metrikleri ve karışıklık matrisi sonuçlarından ulaşılabilmektedir. NDRE analiz sonucundan sınıf3 değerlendirme sonuçlarının karışıklık matrisinden incelenmesi sonucunda pozitif atamaların fazla olduğu lakin atanan pozitif ağaçların çoğunun yanlış atama olduğu görülmektedir. Her iki indeks sonucu yapılan sınıflandırmada sınıf3 için hesaplanan doğruluk metrikleri NDVI için precision 0,92, recall 0,75, F-Skoru 0,84 ve NDRE için precision 0,63, recall 0,77 ve F-Skoru 0,69 olarak bulunmuştur.

Aynı yöntemle kullanılan iki spektral indeks içinde temel performans metrikleri incelendiği vakit ulaşılan sonuçların değerlendirilmesi aşağıda gerçekleştirilmiştir.

NDVI ve NDRE spektral indeksleri sırasıyla Doğruluk (Precision) metriği için 0,81 ve 0,67 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde NDVI ile üretilen sınıflandırma sonuçları için daha az yanlış pozitif sonuçlar barındırdığına ulaşılabilmektedir. Tamlik (Recall) değeri NDVI sonucu için 0,81 ve NDRE sonucu için 0,64 olarak ulaşılmıştır. Hesaplama sonuçları, NDVI ile yapılan sınıflandırma sonucunda gerçek sınıf örneklerinin daha iyi tanımlandığını göstermektedir. İki indeks sonucunda da yapılan sınıflandırma sonuçlarının kalite (jaccard indeks) metriği hesaplanmasıyla NDVI sınıflandırmasının 0,68 ve NDRE sınıflandırmasının 0,48 oranlarında gerçekleştirildiği bulunmuştur. Bulunan değerler NDVI ile gerçekleştirilen sınıflandırma kalitesinin genel sınıflandırma kalitesinde daha üstün olduğu sonucunu ortaya koymaktadır. F1-Skoru her iki indeks ile yapılan sınıflandırma sonuçları için hesaplandığında NDVI ile yapılan sınıflandırma sonuçlarının NDRE ile yapılan sınıflandırma sonuçlarına göre daha dengeli tamlik ve doğruluk değerlerine sahip olduğu görülmüştür. NDVI sınıflandırma sonucu hesaplanan F1-Skor değeri 0,81 ve NDRE sınıflandırma sonucu hesaplanan değer 0,65 olmaktadır.

Yapılan işlemler sonucunda, segmentasyonla tespit edilen ağaç taç sınırları üzerinde spektral indekslere dayalı sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde, NDVI ile 280, NDRE ile 243 ağaç doğru sınıflandırılmıştır. Segmentasyon sonrası önerilen yöntemin kullanılmasıyla doğru sınıflandırılan ağaç sayısı NDVI için 330, NDRE için 268'e yükselmiştir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında, üç sınıflı sınıflandırma işleminde önerilen yöntem, segmentasyon sonrası yapılan işleme kıyasla NDVI'da 50, NDRE'de ise 25 ağaç tacının tahmininde daha iyi bir performans sergilenmesini sağlamıştır. Yapılan iki sınıflı analizler incelendiğinde ise segmentasyon sonucu yapılan NDVI sınıflandırma sonucunda

elde edilen doğruluk oranını %90 oluyorken önerilen yöntem ile bu oran %92'ye ulaşabilmektedir. NDRE için iki sınıflı sınıflandırma gerçekleştirildiğinde doğrudan ağaç taçları üzerinde yapılan çalışma ile %76'lık bir tahmin performansı alınabiliyorken önerilen yöntem ile bu oran %79'a çıkarılabilmektedir. Tahmin performansına ait sonuçlar tablo 6'daki karışıklık matrisinde sunulmuştur.

Tablo 6. Standart 35×35 Piksel Boyutları Kullanılarak Uyarlanabilir İlgi Alanı Penceresiyle 2 Sınıflı Kontrol

Önerilen Yöntem Kullanılarak Yapılan Analiz ile Doğrudan Ağaç Taçlarına Yapılan Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması								
NDVI					NDRE			
Doğrudan Ağaç Taçlarına		Önerilen Yöntem			Doğrudan Ağaç Taçlarına		Önerilen Yöntem	
Sınıf1	Sınıf2	Sınıf1	Sınıf2		Sınıf1	Sınıf2	Sınıf1	Sınıf2
257	4	252	9	1	187	74	192	69
49	103	37	115	2	38	114	35	117

Önerilen yönteminin etkinliğini değerlendirmek ve alternatif yaklaşımlara göre sağladığı avantajları ortaya koymak amacıyla, aynı çalışma alanı ve referans verileri kullanılarak farklı senaryo uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yürütülen sınıflandırma işlemleri sonucunda elde edilen performans değerlendirmeleri, Karışıklık matrisi olarak tablo 7 ve 8'de sunulmuştur.

Tablo 7. 15×15 Piksel boyutu kullanılarak Uyarlanabilir Pencere Yöntemi ile Sabit Penceresiyle 2 Sınıflı Kontrol

Uyarlanabilir Pencere Yöntemi ile Sabit Pencere Yöntemleri Kullanılarak Yapılan Sınıflandırma Çalışmalarının Karşılaştırılması												
NDVI							NDRE					
Uyarlanabilir Pencere Boyutları 15×15			Sabit Pencere Boyutları 15×15				Uyarlanabilir Pencere Boyutları 15×15			Sabit Pencere Boyutları 15×15		
Sınıf1	Sınıf2	Sınıf3	Sınıf1	Sınıf2	Sınıf3		Sınıf1	Sınıf2	Sınıf3	Sınıf1	Sınıf2	Sınıf3
124	9	0	124	9	0	1	78	31	24	78	32	23
48	55	25	44	62	22	2	19	57	52	18	57	53
6	26	120	2	32	118	3	9	23	120	8	26	118

Tablo 8. 10×10 Piksel boyutu kullanılarak Uyarlanabilir Pencere Yöntemi ile Sabit Penceresiyle 2 Sınıflı Kontrol

Uyarlanabilir Pencere Yöntemi ile Sabit Pencere Yöntemleri Kullanılarak Yapılan Sınıflandırma Çalışmalarının Karşılaştırılması												
NDVI							NDRE					
Uyarlanabilir Pencere Boyutları 10×10			Sabit Pencere Boyutları 10×10				Uyarlanabilir Pencere Boyutları 10×10			Sabit Pencere Boyutları 10×10		
Sınıf1	Sınıf2	Sınıf3	Sınıf1	Sınıf2	Sınıf3		Sınıf1	Sınıf2	Sınıf3	Sınıf1	Sınıf2	Sınıf3
120	13	0	122	11	0	1	77	32	24	77	32	24
52	48	28	47	57	24	2	20	52	56	19	57	52
8	16	128	7	21	124	3	11	20	121	8	27	117

Karışıklık matrisleri ve gerçekleştirilen doğruluk analizleri göz önüne alınarak önerilen yöntem, ağaç taç sınırları bulunarak doğrudan taç alanına yapılan analiz (SHP), önerilen yöntemle farklı bir bakış açısı sunularak; uyarlanabilir pencere boyutu değiştirilerek, pencere boyutunun sabit, standart pencere boyutunun değiştirilmesiyle yapılan analiz yöntemlerine ait de sınıflandırmalar gerçekleştirilerek yapılan analiz sonuçları aşağıda yer almaktadır. Yapılan bu işlem ile önerilen yöntem ile kullanılabilecek diğer yollar karşılaştırılmış, yapılan iyileştirme sunulmuştur. Önerilen yöntem ile çalışma alanında her iki indeks ile gerçekleştirilen sınıflandırma sonuçlarıyla bulunan ağaçların doğruluk oranları çalışma alanı ile yüzdesel olarak değerlendirilmiştir. Alternatif yöntemler birlikte değerlendirilerek aradaki fark sayısal hesaplamalar ile karşılaştırmalı olarak aşağıda sunulmuştur.

Sunulan Yöntemi ile İki İndeks Analizi Sonucunda Elde Edilen F-Score Değerleri:

- NDRE sonucu %65 – Çalışma alanında bulunan 413 ağaçtan 269 ağaç doğru olarak tahmin edilmiştir.

- NDVI sonucu %80 – Çalışma alanında bulunan 413 ağaçtan 331 ağaç doğru olarak tahmin edilmiştir.

Ağaç taç sınırları tespit edilerek Doğrudan ağaç taç alanına yapılan uygulama sonucunda elde edilen:

- NDRE sonucu %59 – Çalışma alanında bulunan 413 ağaçtan 244 ağaç doğru olarak tahmin edilmiştir.

- NDVI sonucu %68 – Çalışma alanında bulunan 413 ağaçtan 281 ağaç doğru olarak tahmin edilmiştir.

Standart 15×15 Piksel Boyutları Kullanılarak Uyarlanabilir İlgi Alanı Penceresiyle yapılan uygulama sonucunda elde edilen:

- NDRE sonucu %61 – Çalışma alanında bulunan 413 ağaçtan 252 ağaç doğru olarak tahmin edilmiştir.

- NDVI sonucu %70 – Çalışma alanında bulunan 413 ağaçtan 290 ağaç doğru olarak tahmin edilmiştir.

Standart 10×10 Piksel Boyutları Kullanılarak Uyarlanabilir İlgi Alanı Penceresiyle yapılan uygulama sonucunda elde edilen:

- NDRE sonucu %59 – Çalışma alanında bulunan 413 ağaçtan 244 ağaç doğru olarak tahmin edilmiştir.

- NDVI sonucu %69 – Çalışma alanında bulunan 413 ağaçtan 285 ağaç doğru olarak tahmin edilmiştir.

Önerilen yöntemde uyarlanabilir ilgi alanı penceresi tercih edilmiştir. Bu yaklaşıma alternatif olarak sabit pencere boyutlarının kullanıldığı senaryolarda değerlendirilmiştir. Aynı çalışma alanı ve aynı referans verisi kullanılarak, farklı sabit pencere boyutlarıyla yapılan sınıflandırma sonuçları aşağıda sunulmuştur.

Standart 35×35 Piksel Boyutları Kullanılarak Sabit İlgi Alanı Penceresiyle yapılan uygulama sonucunda elde edilen F-Score değerleri:

- NDRE sonucu %63 – Çalışma alanında bulunan 413 ağaçtan 260 ağaç doğru olarak tahmin edilmiştir.

- NDVI sonucu %78 – Çalışma alanında bulunan 413 ağaçtan 322 ağaç doğru olarak tahmin edilmiştir.

Standart 15×15 Piksel Boyutları Kullanılarak Sabit İlgi Alanı Penceresiyle yapılan uygulama sonucunda elde edilen:

- NDRE sonucu %60 – Çalışma alanında bulunan 413 ağaçtan 248 ağaç doğru olarak tahmin edilmiştir.

- NDVI sonucu %72 – Çalışma alanında bulunan 413 ağaçtan 297 ağaç doğru olarak tahmin edilmiştir.

Standart 10×10 Piksel Boyutları Kullanılarak Sabit İlgi Alanı Penceresiyle yapılan uygulama sonucunda elde edilen:

- NDRE sonucu %60 – Çalışma alanında bulunan 413 ağaçtan 248 ağaç doğru olarak tahmin edilmiştir.

- NDVI sonucu %71 – Çalışma alanında bulunan 413 ağaçtan 293 ağaç doğru olarak tahmin edilmiştir.

Sunulan sonuçlar, pencere boyutunun sınıflandırma doğruluğu üzerindeki etkisini göstermektedir. Önerilen yöntem ile, sabit pencere ve doğrudan ağaç taç alanı üzerinde gerçekleştirilen sınıflandırmalara kıyasla daha tutarlı sonuçlar sunulmaktadır. Yapılan sınıflandırmalar sırasında indeks çeşidinin değiştirilmesi, önerilen yöntem ile gerçekleştirilen sınıflandırma doğruluğunun karşılaştırılan senaryolara göre daha ön planda olduğu görülmektedir.

4. TARTIŞMA

Gerçekleştirilen çalışmada önerilen yöntem, 35×35 piksel boyutlarındaki ilgi alanı penceresi, ağaç metriklerini kullanarak sınıflandırma doğruluğunu iyileştirmek amacıyla geliştirilmiştir. Uyarlanabilir pencere yaklaşımı, sabit boyutlu pencere ile yaşanan sınırlılığı aşarak segmentasyon sonucu yaşanan hatalar kaynaklı yaşanan sınıflandırma problemleri bireysel ağaç bazında tahmin doğruluğunu artırarak azaltmayı amaçlamaktadır. Çalışma alanının tamamının indeks analizine dahil edilmesi yerine, ağaç taç alanlarının kullanılması analizi daha etkin hâle getirerek ağaç dışındaki detayların (yol, bina, çimen, maki vb.) elenmesini sağlamaktadır. Ağaç taç merkezlerine atanan ve ağaç taçlarına uyarlanabilen ilgi alanı pencereleri sayesinde, gürültü verisi ile veri yoğunluğu önemli ölçüde azaltılmış, böylece hassasiyet artırılmıştır. Her ağaç tacı bireysel olarak düşünüldüğünde segmentasyon sonucunda birleştirilmiş çoklu ağaç taç kümeleri ya da olduğundan küçük gösterilmiş ağaç taçlarında çalışılarak, çalışma alanı içerisinde bulunan gürültü verisinin azaltılmasının tahmin doğruluğunu artırdığı gösterilmiştir. Başka bir deyişle çalışma alanında ilgilenilen objeye yöneltilen odak sınıflandırma hassasiyetini artıran etken olmuştur.

Standart ağaç taçlarına uygulanan spektral indeks analiz çalışması, segmentasyon çalışmasının hassasiyetine bağımlı olması nedeniyle sonuçlar çoğunlukla segmentasyon kaynaklı hatalar içermektedir. Gerçekleştirilen karşılaştırmalı analizlerde, önerilen yöntemin NDVI ve NDRE bitki indekslerine dayalı sınıflandırmalarda yüksek doğruluk sağladığı sunulmuştur. Önerilen yöntem için NDVI temelli sınıflandırmada %80'in üzerinde doğruluk iyileştirmesi elde edilebilmesi, yöntemin uygulanan çalışma alanında etkin bir performans sergilediğini göstermektedir.

Uyarlanabilir pencere atanmasının sağladığı avantaj, sınıflandırılacak obje için temel nicelik bilgilerine göre odaklanması gereken çalışma alanını optimize etmesidir. Bu sayede büyük oranda çalışma yükü engellenmekte, gölge ve gürültü etkisi en aza indirilmektedir. Önerilen yöntem ile yan çıktılar arasında ortalama taç alanı ve taç çapı gibi bilgiler çalışma alanına ait nicel bilgiler sağlamaktadır. Sağlanan nicel bilgiler standart ilgi alanı penceresinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Sağlanan tüm avantajların yanında önerilen yöntemin verimli çalışabilmesi için önemli girdi verilerine ihtiyaç bulunmaktadır. Yapılan çalışma karma veri kullanılarak gerçekleştirilmiştir, yani LiDAR nokta bulutu ve ortofoto görüntü birlikte kullanılmıştır. Kullanılan indeks çeşitliliği operatör sunacağı veriye göre değişme esnekliği oluşturulan

programın esnekliği sayesinde sağlanmaktadır lakin gerçekleştirilen çalışmada multispektral ortofoto kullanılmıştır. Kullanılan bantlar; kırmızı, yeşil, mavi, kızıl ötesi, kızıl bölge olmaktadır. Çalışma bölgesi ağaç çeşitliliği önceden bilinmelidir, önerilen yöntemde kullanılan çalışma bölgesi bozuk sarıçam ormanıdır. Böylelikle hesaplanan ortalama ağaç metrikleri ile literatürden elde edilen sarıçam bilgisi karşılaştırılabilmiştir. Böylelikle standart taç metrikleri belirlenebilmiş ve çalışma alanında kullanılabilmiştir. Önerilen yöntemin karma veri ile çalışması, veri temini konusunda gerçekleştirilmesi gereken işlem süresini daha uzun hale getirmektedir. Ayrıca farklı veri tiplerinin aynı anda kullanılması işlem sırasında meydana gelen sistematik hataların da birikmesine olanak vermektedir. Ayrıca gerçekleştirilen spektral analizler ve konumsal işlemler, temin edilmesi gereken görüntü verilerinin çözünürlüklerini önemli bir bağlayıcı etken haline getirmektedir.

Sonuç olarak önerilen yöntem sınıflandırma doğruluğunu artırma potansiyeline sahip olduğu gösterilmiştir. Gelecek çalışmalarda, segmentasyon kalitesi ve veri niteliği, sınıflandırma doğruluğunu doğrudan etkileyen kritik faktörler olmaktadır. Bu öneriler göz önüne alınarak, önerilen yöntemin genellenebilirliği ve ölçeklenebilirliğinin daha kapsamlı biçimde değerlendirilebilmesi için, farklı bölgeler ait, değişen yoğunluk ve tür çeşitliliğine sahip orman alanlarında uygulamalar gerçekleştirilmesi önemli olmaktadır. Ayrıca, ilgi alanı penceresi için farklı adaptasyon kriterlerinin denenmesi, alternatif sınıflandırma algoritmalarının kullanılması ve daha yüksek spektral ve mekânsal çözünürlüğe sahip verilerin değerlendirilmesi, yöntemin farklı koşullara uyarlanabilirliğini artıracak ve sınıflandırma performansının detaylı biçimde irdelenmesini sağlayacaktır.

4.1. Uyarlanabilir Pencere İndis Çalışmasını Etkileyen Faktörlerin İrdelenmesi

Uyarlanabilir pencere yaklaşımı, görüntüdeki yerel olarak bulunan objelerin nicel niteliklerine odaklanmaktadır. Bu özelliklere göre pencere boyutu dinamik olarak belirlenmektedir, lakin bu esneklik çeşitli faktörlerden etkilenmektedir ve bu etki sınıflandırma performansı üzerinde doğrudan belirleyici olabilmektedir.

Uyarlanabilen pencere yönteminin istenilen verimde çalışabilmesi, görüntünün konumsal çözünürlüğüyle doğrudan bağlantılıdır. Görüntüdeki düşük konumsal çözünürlük, bir pikselin birden fazla objeyi temsil etmesiyle sonuçlanabilmektedir ve bu durum ilgi alanı penceresi kullanılarak odaklanılan objenin homojenlik varsayımını zayıflatabilmektedir.

Kullanılan görüntünün yüksek çözünürlükteki nicelikleri sınıflandırma da istenilen verime ulaşılmasında önemli bir belirleyici unsurdur.

Çalışma alanı ortamında göre sınıflandırma için kullanılacak yöntemler çeşitlilik gösterebilmektedir. Kullanılan spektral analiz yöntemlerine göre uygun çalışma alanını tanımlayabilecek eşik değerlerinin seçilmesi, spektral analizin kullanılırken sağlanması beklenen verimin artırılması için önem arz etmektedir. Çalışmada kullanılan spektral indeksler NDVI ve NDRE analizi için çalışma alanında eşik değeri çalışması gerçekleştirilmiştir. NDVI analizi genel bitki örtüsü ölçütleri ve homojen çalışma bölgelerinde daha tutarlı sonuçlar alınmasına imkân sağlarken, NDRE kullanılarak gerçekleştirilen spektral analizlerde klorofil yoğunluklu analizler pencere içindeki küçük değişimlerden etkilenilmesine neden olmaktadır. Belirlenen eşik değerinin bu ölçüde değişilmesine rağmen, çalışmada amaçlanan ilgi objesine odaklanılarak veri hacminin azaltılması, eşik değeri ile ilişkilendirilen piksel sayısında da azalmaya neden olmaktadır. Böyle durumlarda sabit bir varyans eşiği kullanmak bazı bölgeler için başarılı olsa da heterojen bölgelerde yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle uyarlanabilme sisteminin esnekleştirilmesi böyle bir soruna çözüm olanağı sağlayabilir.

Hesaplama işlemleri daha küçük bölgeler ve daha az sayıda ilgilenilen verinin olması durumlarında işlem hızı ve maliyeti yüksek olmasa da aksi durumlarda yüksek bir hesaplama yükü oluşturabilme ihtimali bulunmaktadır. Bu duruma karşılık yöntemin daha pratik bir uygulanabilirliği için algoritma optimizasyonu ve işlemlerin paralel yürütülebilirliğinin değerlendirilmesi önerilmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez kapsamında, çok bantlı ortofoto görüntüler ile LiDAR nokta bulutu verilerinin entegre edildiği hibrit bir yöntem kullanılarak hassas koordinatları tespit edilen bireysel ağaç taçlarının sınıflandırılmasını gerçekleştirilmek amacıyla, ağaç taç metriklerine dayalı olarak geliştirilen ve odak objeye uyarlanabilen ilgi alanı pencereleri üretilmiştir. Bu pencereler, her bir ağaç merkezine atanarak sınıflandırmada kullanılmıştır.

Önerilen yöntemle, ilgilenilen obje için metrik özellikler kullanılarak özel çalışma penceresi yöneltilip daha detaylı bir analiz oluşturulmuştur. Geliştirilen pencere tabanlı yaklaşım; her bir ağaç tacı için dinamik olarak belirlenen analiz pencerelerinin içinde, normalize edilmiş vejetasyon indeksi ve normalize edilmiş kırmızı kenar indeksi gibi spektral analizler ve taç alanı, taç genişliği gibi metrik metriklerle birlikte değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler için çalışma alanının tamamı kullanılarak uygun eşik değeri atamaları gerçekleştirilmiştir. Her spektral analiz çeşidi için ayrı belirlenen eşik değerleri ilgili spektral analizler ile eşleştirilerek bireysel ağaç taçları ayrı yöntemler ile sınıflandırmış ve '.shp' dosyası biçiminde kaydedilmiştir. Değerlendirme sonuçları kullanılarak her ağaç tacı için ayrı etiketler üretilmiştir. Tüm süreç MATLAB ortamında, mevcut Kanopi Yükseklik Modeli (CHM) kullanılarak tam otomatik şekilde gerçekleştirilmiştir.

Tüm sınıflandırma sonuçları incelendiğinde NDVI sonuçlarının daha yüksek doğruluğa ulaştığı görülmektedir. Karışıklık matrisleri incelendiğinde gerçekleştirilen sınıflandırmalar sonucunda özellikle sınıf2'nin (orta sınıf) sınıflandırmada en çok zorlanılan sınıf olduğu görülmektedir. Ayrıca karışıklık matrisleri incelendiğinde çalışmada önerilen 35×35 piksel boyutları kullanılarak, ağaç boyutlarına uyarlanabilir ilgi alanı penceresi ile yapılan sınıflandırma sonucunda tespit edilen sınıflar arası karışıklıkların en aza indirilebildiği görülmüştür. Çalışmada kullanılan tüm yöntem ve indeks çeşitleri ile sınıf2 için en yüksek sınıflandırma doğruluğu önerilen yaklaşım ile elde edilmiştir (NDVI, F-Skoru= %71). Tüm sınıflar incelendiğinde en yüksek çalışma doğruluğu yine önerilen yaklaşım ile NDVI analizi gerçekleştirilmesi sonucunda elde edilmiştir. Elde edilen doğruluklar sırasıyla Correctness 0,81, Completeness 0,81, Quality 0,68, F-Score 0,80 olarak hesaplanmıştır. NDRE analiz çalışması için elde edilen en yüksek doğruluk oranı yine önerilen yöntem ile elde edilmiştir. Doğrudan ağaç taçlarına uygulanan analiz çalışması sonucu elde edilen F-Score değeri %58 olurken önerilen çalışma için elde edilen F-Score

değeri %65 olmaktadır. NDRE çalışması için doğrudan ağaç taçlarına uygulanan analiz çalışması sonucu elde edilen doğruluk oranları sırasıyla; Correctness 0,63, Completeness 0,59, Quality 0,42 olarak hesaplanmıştır. Önerilen yaklaşımla hesaplanan doğruluk oranları; Correctness 0,66, Completeness 0,65, Quality 0,48 olarak hesaplanmıştır. Önerilen yaklaşım çalışma alanı sınıflandırma çalışmalarında doğrudan ilgilenilen objeye yaklaşımda alternatif bir çözüm olanağı sağlamaktadır. Yapılan ROI çalışması sonucunda sınıflandırma sonuçlarının iyileştirilmesinde önemli oranda bir artış sağlandığı görülmektedir.

Yapılan sınıflandırmalar 2 sınıfta değerlendirildiğinde NDVI sonuçlarının yine daha yüksek doğrulukta olduğu görülmektedir. Karışıklık matrislerinin incelenmesiyle sonuçlardaki yanlış tahmin oranlarının önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. İyileştirme oranlarına bakıldığında ise ağaç taç sınırlarına doğrudan gerçekleştirilen NDVI sonucu yapılan sınıflandırma sonucunda bulunan F-Score değeri %90 oluyorken önerilen yöntemle gerçekleştirilen NDVI sonucu %92 olmaktadır. NDRE ile gerçekleştirilen sınıflandırma sonucunda, doğrudan ağaç taç sınırlarıyla gerçekleştirilen spektral analiz sonucunda elde edilen F-Score değeri %76 önerilen yöntemle ise %79 olarak bulunmuştur. Doğruluk oranları incelendiğinde, önerilen yaklaşımın, ağaç taç sınırlarına doğrudan uygulanan spektral analizle sınıflandırma doğruluğunu arttırdığı görülmektedir.

Referans verinin operatör yardımıyla üretilmesi yanlış etiketlemelere sebep olabilmektedir. Örneğin görüntüde sağlıklı görünen bir ağacın aslında yarı sağlıklı olması ya da yarı sağlıklı görünen bir ağacın aslında kuruma eğilimine geçmesi kullanıcıyı yanıltabilmektedir. Operatör desteği ile üretilen referans verisi dışında kalan süreç içerisinde üretilen tüm veriler ve yapılan tüm işlemler bir müdahale olmadan otomatik bir şekilde Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir.

Gelecekteki çalışmalarda bireysel ağaç taçlarının sınıflandırma çalışmalarında ve ağaç metrik yapılarının tespit edilmesinin üzerinde yoğunlaşılacaktır. Önerilen yöntemin geliştirilmesi için, arazi ortamında sınıflandırma yapılacak bütün ağaçlar için istenilen etiket değerlerine ilişkin örnek referans verileri hassas koordinatlı bir şekilde spektrometre ölçümleriyle toplanması ve yanlış tespit edilen ağaçların yerinde incelenmesi düşünülmektedir. Ayrıca bu konu hususunda makine öğrenmesi ve karma verilerin ortak kullanılmasındaki alternatif yöntemler üzerine çalışmalar yapılması hedeflenmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Abdollahnejad, A., & Panagiotidis, D. (2020). Tree species classification and health status assessment for a mixed broadleaf-conifer forest with UAS multispectral imaging. *Remote Sensing*, 12(22), 3722.
- Akın, G. (2006). Küresel ısınma, nedenleri ve sonuçları. *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, 46(2), 29-43.
- Alhammadi, M. S., & Glenn, E. P. (2008). Detecting date palm trees health and vegetation greenness change on the eastern coast of the United Arab Emirates using SAVI. *International journal of remote sensing*, 29(6), 1745-1765.
- Alvarez-Taboada, F., Paredes, C., & Julián-Pelaz, J. (2017). Mapping of the invasive species *Hakea sericea* using unmanned aerial vehicle (UAV) and WorldView-2 imagery and an object-oriented approach. *Remote Sensing*, 9(9), 913.
- Asner, G. P., Knapp, D. E., Kennedy-Bowdoin, T., Jones, M. O., Martin, R. E., Boardman, J., & Hughes, R. F. (2008). Invasive species detection in Hawaiian rainforests using airborne imaging spectroscopy and LiDAR. *Remote sensing of Environment*, 112(5), 1942-1955.
- Asner, G. P., & Mascaro, J. (2014). Mapping tropical forest carbon: Calibrating plot estimates to a simple LiDAR metric. *Remote Sensing of Environment*, 140, 614-624.
- Bahadır, M. (2023). İyileştirilmiş Lokal Maksimum Yöntemi ile Nokta Bulutlarından Ağaç Taç Segmentasyonu ve Metriklerinin Tahmini. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Ballanti, L., Blesius, L., Hines, E., & Kruse, B. (2016). Tree species classification using hyperspectral imagery: A comparison of two classifiers. *Remote Sensing*, 8(6), 445.
- Baltsavias, E. P. (1999). Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 54(2-3), 199-214.
- Barka, I., Bucha, T., Molnár, T., Móricz, N., Somogyi, Z., & Koreň, M. (2019). Suitability of MODIS-based NDVI index for forest monitoring and its seasonal applications in Central Europe. *Central European Forestry Journal*, 66(3-4), 206-217.
- Barnes, C., Balzter, H., Barrett, K., Eddy, J., Milner, S., & Suárez, J. C. (2017). Airborne laser scanning and tree crown fragmentation metrics for the assessment of *Phytophthora ramorum* infected larch forest stands. *Forest Ecology and Management*, 404, 294-305.

- Bauwens, S., Bartholomeus, H., Calders, K., & Lejeune, P. (2016). Forest inventory with terrestrial LiDAR: A comparison of static and hand-held mobile laser scanning. *Forests*, 7(6), 127.
- Belcore, E., & Latella, M. (2022). Riparian ecosystems mapping at fine scale: a density approach based on multi-temporal UAV photogrammetric point clouds. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 8(5), 644-655.
- Bergmüller, K. O., & Vanderwel, M. C. (2022). Predicting tree mortality using spectral indices derived from multispectral UAV imagery. *Remote Sensing*, 14(9), 2195.
- Bonnet, S., Lisein, J., & Lejeune, P. (2017). Comparison of UAS photogrammetric products for tree detection and characterization of coniferous stands. *International Journal of Remote Sensing*, 38(19), 5310-5337.
- Bouvier, M., Durrieu, S., Fournier, R. A., & Renaud, J. P. (2015). Generalizing predictive models of forest inventory attributes using an area-based approach with airborne LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 156, 322-334.
- Buendía-Espinoza, J. C., Martínez-Ochoa, E. D. C., García-Núñez, R. M., Arrazate-Jiménez, S. D. C., & Sánchez-Vélez, A. (2022). Prediction of resin production in Copal Trees (*Bursera* spp.) using a random forest model. *Sustainability*, 14(13), 8047.
- Cai, L., Shi, W., Miao, Z., & Hao, M. (2018). Accuracy assessment measures for object extraction from remote sensing images. *Remote Sensing*, 10(2), 303.
- Cetin, Z., & Yastikli, N. (2022). The use of machine learning algorithms in urban tree species classification. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(4), 226.
- Chaerle, L., & Van Der Straeten, D. (2000). Imaging techniques and the early detection of plant stress. *Trends in plant science*, 5(11), 495-501.
- Chi, D., Degerickx, J., Yu, K., & Somers, B. (2020). Urban tree health classification across tree species by combining airborne laser scanning and imaging spectroscopy. *Remote Sensing*, 12(15), 2435.
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 92, 79-97.
- Cruz-Mota, J., Bogdanova, I., Paquier, B., Bierlaire, M., & Thiran, J. P. (2012). Scale invariant feature transform on the sphere: Theory and applications. *International journal of computer vision*, 98, 217-241.

- Dash, J. P., Pearse, G. D., & Watt, M. S. (2018). UAV multispectral imagery can complement satellite data for monitoring forest health. *Remote Sensing*, 10(8), 1216.
- Dash, J. P., Watt, M. S., Paul, T. S., Morgenroth, J., & Pearse, G. D. (2019). Early detection of invasive exotic trees using UAV and manned aircraft multispectral and LiDAR data. *Remote Sensing*, 11(15), 1812.
- Dodet, M., & Collet, C. (2012). When should exotic forest plantation tree species be considered as an invasive threat and how should we treat them?. *Biological invasions*, 14(9), 1765-1778.
- Doughty, C. E., Cheesman, A. W., Riutta, T., Thomson, E. R., Shenkin, A., Nottingham, A. T., ... & Malhi, Y. (2021). Predicting tropical tree mortality with leaf spectroscopy. *Biotropica*, 53(2), 581-595.
- Eitel, J. U., Vierling, L. A., Litvak, M. E., Long, D. S., Schulthess, U., Ager, A. A., ... & Stoscheck, L. (2011). Broadband, red-edge information from satellites improves early stress detection in a New Mexico conifer woodland. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3640-3646.
- Durgun, H., Çoban, H. O., & Eker, M. (2022). İnsansız hava aracıyla elde edilen hava fotoğraflarından kızılçam ağaçlarının çap ve boylarının ölçümü ve gövde hacminin tahmini. *Turkish Journal of Forestry*, 23(4), 255-267.
- Fassnacht, F. E., Latifi, H., Stereńczak, K., Modzelewska, A., Lefsky, M., Waser, L. T., ... & Ghosh, A. (2016). Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. *Remote sensing of environment*, 186, 64-87.
- Ferreira, M. P., Zortea, M., Zanotta, D. C., Shimabukuro, Y. E., & de Souza Filho, C. R. (2016). Mapping tree species in tropical seasonal semi-deciduous forests with hyperspectral and multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 179, 66-78.
- Fraser, C. S. (2013). Automatic camera calibration in close range photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 79(4), 381-388.
- Gini, R., Sona, G., Ronchetti, G., Passoni, D., & Pinto, L. (2018). Improving tree species classification using UAS multispectral images and texture measures. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(8), 315.
- Gülcü, S., & Bilir, N. (2017). Growth and survival variation among scots pine (*Pinus sylvestris* L.) provenances. *International journal of genomics*, 2017(1), 1904623.
- Hao, Y., Widagdo, F. R. A., Liu, X., Liu, Y., Dong, L., & Li, F. (2021). A hierarchical region-merging algorithm for 3-D segmentation of individual trees using UAV-

- LiDAR point clouds. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1-16.
- Harikumar, A., Liang, X., Bovolo, F., & Bruzzone, L. (2022). Void-Volume-Based stem geometric modeling and branch-knot localization in terrestrial laser scanning data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 3024-3040.
- Herrero-Huerta, M., Lindenbergh, R., & Rodríguez-Gonzálvez, P. (2018). Automatic tree parameter extraction by a Mobile LiDAR System in an urban context. *PloS one*, 13(4), e0196004.
- Hetemäki, L. (2014). Future of the European Forest-Based Sector. *Structural Changes Towards Bioeconomy. What Science Can Tell Us*, 6.
- He-Ya, S., Huang, X., Zhou, D., Zhang, J., Bao, G., Tong, S., ... & Guo, J. (2024). Identification of Larch Caterpillar Infestation Severity Based on Unmanned Aerial Vehicle Multispectral and LiDAR Features. *Forests*, 15(1), 191.
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1-6.
- Huebner, C. D. (2007). Detection and monitoring of invasive exotic plants: a comparison of four sampling methods. *Northeastern Naturalist*, 14(2), 183-206.
- Hui, Z., Cai, Z., Xu, P., Xia, Y., & Cheng, P. (2023). Tree Species Classification Using Optimized Features Derived from Light Detection and Ranging Point Clouds Based on Fractal Geometry and Quantitative Structure Model. *Forests*, 14(6), 1265.
- Hui, Z., Cheng, P., Yang, B., & Zhou, G. (2022). Multi-level self-adaptive individual tree detection for coniferous forest using airborne LiDAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 114, 103028.
- Hyypä, E., Kukko, A., Kaartinen, H., Yu, X., Muhojoki, J., Hakala, T., & Hyypä, J. (2022). Direct and automatic measurements of stem curve and volume using a high-resolution airborne laser scanning system. *Science of Remote Sensing*, 5, 100050.
- Klouček, T., Komárek, J., Surový, P., Hrach, K., Janata, P., & Vašíček, B. (2019). The use of UAV mounted sensors for precise detection of bark beetle infestation. *Remote Sensing*, 11(13), 1561.
- Lausch, A., Borg, E., Bumberger, J., Dietrich, P., Heurich, M., Huth, A., ... & Schaepman, M. E. (2018). Understanding forest health with remote sensing, part III: requirements

- for a scalable multi-source forest health monitoring network based on data science approaches. *Remote sensing*, 10(7), 1120.
- Leckie, D. G., Gougeon, F. A., Tinis, S., Nelson, T., Burnett, C. N., & Paradine, D. (2005). Automated tree recognition in old growth conifer stands with high resolution digital imagery. *Remote Sensing of Environment*, 94(3), 311-326.
- Lin, Y., & Herold, M. (2016). Tree species classification based on explicit tree structure feature parameters derived from static terrestrial laser scanning data. *Agricultural and Forest meteorology*, 216, 105-114.
- Liu, M., Han, Z., Chen, Y., Liu, Z., & Han, Y. (2021). Tree species classification of LiDAR data based on 3D deep learning. *Measurement*, 177, 109301.
- Luhmann, T., Fraser, C., & Maas, H. G. (2016). Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 37-46.
- Mäkinen, H., & Isomäki, A. (2004). Thinning intensity and growth of Scots pine stands in Finland. *Forest Ecology and Management*, 201(2-3), 311-325.
- Yıldırım, M. (2022). *Derin Öğrenme ile Nokta Bulutu Üzerinden Bina Çatı Tiplerinin Sınıflandırılması* K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Mitchell, C. P., Stevens, E. A., & Watters, M. P. (1999). Short-rotation forestry—operations, productivity and costs based on experience gained in the UK. *Forest ecology and management*, 121(1-2), 123-136.
- Morales-Gallegos, L. M., Martínez-Trinidad, T., Hernández-de la Rosa, P., Gómez-Guerrero, A., Alvarado-Rosales, D., & Saavedra-Romero, L. D. L. (2023). Tree health condition in urban green areas assessed through crown indicators and vegetation indices. *Forests*, 14(8), 1673.
- Moriya, É. A. S., Imai, N. N., Tommaselli, A. M. G., Honkavaara, E., & Rosalen, D. L. (2023). Design of Vegetation Index for Identifying the Mosaic Virus in Sugarcane Plantation: A Brazilian Case Study. *Agronomy*, 13(6), 1542.
- Moskal, L. M., & Zheng, G. (2011). Retrieving forest inventory variables with terrestrial laser scanning (TLS) in urban heterogeneous forest. *Remote Sensing*, 4(1), 1-20.
- Näsi, R., Honkavaara, E., Blomqvist, M., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Hakala, T., Viljanen, N., ... & Holopainen, M. (2018). Remote sensing of bark beetle damage in urban forests at individual tree level using a novel hyperspectral camera from UAV and aircraft. *Urban Forestry & Urban Greening*, 30, 72-83.

- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied geomatics*, 6, 1-15.
- Niranjana, K. K., Devi, M. K., & Mary, L. (2012). Image Segmentation Using MCWS Algorithm. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 1, 1-4.
- o'Rourke, J. (1998). *Computational geometry in C*. Cambridge university press.
- Özçelik, R. (2006). BİYOLOJİK ÇEŞİTLİLİĞİ KORUMAYA YÖNELİK YAPILAN (PLANLAMA ve KORUMA) ÇALIŞMALAR ve TÜRKİYE ORMANCILIĞINA YANSIMALARI. *Turkish Journal of Forestry*, 7(2), 23-36.
- T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Orman Genel Müdürlüğü (2021). 2020 Türkiye Orman Varlığı Ankara OGM Ofset
- Panagiotidis, D., Abdollahnejad, A., Surový, P., & Chiteculo, V. (2017). Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International journal of remote sensing*, 38(8-10), 2392-2410.
- Park, T. (2020). Potential lidar height, intensity, and ratio parameters for plot dominant species discrimination and volume estimation. *Remote Sensing*, 12(19), 3266.
- Parvati, K., Prakasa Rao, B. S., & Mariya Das, M. (2008). Image Segmentation Using Gray-Scale Morphology and Marker-Controlled Watershed Transformation. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2008(1), 384346.
- Pearse, G. D., Dash, J. P., Persson, H. J., & Watt, M. S. (2018). Comparison of high-density LiDAR and satellite photogrammetry for forest inventory. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 142, 257-267.
- Perry, E. M., Goodwin, I., & Cornwall, D. (2018). Remote sensing using canopy and leaf reflectance for estimating nitrogen status in red-blush pears. *HortScience*, 53(1), 78-83.
- Petrie, G. (2013). Commercial Operation of Lightweight. *GEOInformatics*, 16(1), 28.
- Piiroinen, R., Fassnacht, F. E., Heiskanen, J., Maeda, E., Mack, B., & Pellikka, P. (2018). Invasive tree species detection in the Eastern Arc Mountains biodiversity hotspot using one class classification. *Remote sensing of environment*, 218, 119-131.
- Pingel, T. J., Clarke, K. C., & McBride, W. A. (2013). An improved simple morphological filter for the terrain classification of airborne LIDAR data. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 77, 21-30.
- Polle, A., & Rennenberg, H. (2019). Physiological responses to abiotic and biotic stress in forest trees. *Forests*, 10(9), 711.

- Pouliot, D. A., King, D. J., Bell, F. W., & Pitt, D. G. (2002). Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration. *Remote sensing of environment*, 82(2-3), 322-334.
- Qiu, P., Wang, D., Zou, X., Yang, X., Xie, G., Xu, S., & Zhong, Z. (2019). Finer resolution estimation and mapping of mangrove biomass using UAV LiDAR and worldview-2 data. *Forests*, 10(10), 871.
- Remondino, Fabio, and Sabry El-Hakim. "Image-Based 3D Modelling: A Review." *The Photogrammetric Record*, vol. 21, no. 115, 7 Aug. 2006, pp. 269–291, <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x>.
- Rock, B. N., Vogelmann, J. E., Williams, D. L., Vogelmann, A. F., & Hoshizaki, T. (1986). Remote Detection of Forest Damage: Plant responses to stress may have spectral "signatures" that could be used to map, monitor, and measure forest damage. *Bioscience*, 36(7), 439-445.
- Sarıtürk, B., & Şeker, D. Z. (2017). SFM TEKNİĞİ İLE 3B OBJE MODELLENMESİNDE KULLANILAN TİCARİ VE AÇIK-KAYNAK KODLU YAZILIMLARIN KARŞILAŞTIRILMASI. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(4), 126-131.
- Schops, T., Schonberger, J. L., Galliani, S., Sattler, T., Schindler, K., Pollefeys, M., & Geiger, A. (2017). A multi-view stereo benchmark with high-resolution images and multi-camera videos. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 3260-3269).
- Selvik, G. (1989). Roentgen stereophotogrammetry: a method for the study of the kinematics of the skeletal system. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 60(sup232), 1-51.
- Senf, C., Seidl, R., & Hostert, P. (2017). Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions. *International journal of applied earth observation and geoinformation: ITC journal*, 60, 49–60. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.04.004>
- Sharifi, A., & Felegari, S. (2023). Remotely sensed normalized difference red-edge index for rangeland biomass estimation. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 95(7), 1128-1136.
- Siebert, Sebastian, and Jochen Teizer. "Mobile 3D Mapping for Surveying Earthwork Projects Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) System." *Automation in*

- Construction, vol. 41, no. 10.1016, May 2014, pp. 1–14, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.01.004>.
- Šiljeg, A., Panda, L., Domazetović, F., Marić, I., Gašparović, M., Borisov, M., & Milošević, R. (2022). Comparative assessment of pixel and object-based approaches for mapping of olive tree crowns based on UAV multispectral imagery. *Remote sensing*, 14(3), 757.
- Snaveely, N., Seitz, S. M., & Szeliski, R. (2008). Modeling the world from internet photo collections. *International journal of computer vision*, 80, 189-210.
- Sothe, C., Dalponte, M., Almeida, C. M. D., Schimalski, M. B., Lima, C. L., Liesenberg, V., ... & Tommaselli, A. M. G. (2019). Tree species classification in a highly diverse subtropical forest integrating UAV-based photogrammetric point cloud and hyperspectral data. *Remote Sensing*, 11(11), 1338.
- Sporek, M., & Sporek, K. (2023). Allometric Model of Crown Length for *Pinus sylvestris* L. Stands in South-Western Poland. *Forests*, 14(9), 1779.
- Syifa, M., Park, S. J., & Lee, C. W. (2020). Detection of the pine wilt disease tree candidates for drone remote sensing using artificial intelligence techniques. *Engineering*, 6(8), 919-926.
- Tilki, F., & Çiçek, E. (2003). Biyokütle enerjisi ve enerji ormancılığı.
- URL-1 (18, Mayıs, 2025) <https://cevresehgostergeler.csb.gov.tr/orman-alanlarinin-agac-turlerine-gore-dagilimi-i-85785>
- URL-2 (18, Mayıs, 2025)
<https://www.nv5geospatialsoftware.com/docs/RegionOfInterestTool.html>
- URL-3 (18, Mayıs, 2025)
<https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/polyshape.centroid.html>
- Varin, M., Chalghaf, B., & Joannis, G. (2020). Object-Based Approach Using Very High Spatial Resolution 16-Band WorldView-3 and LiDAR Data for Tree Species Classification in a Broadleaf Forest in Quebec, Canada. *Remote Sensing*, 12(18), 3092. <https://doi.org/10.3390/rs12183092>
- Verwijst, T., & Telenius, B. (1999). Biomass estimation procedures in short rotation forestry. *Forest ecology and management*, 121(1-2), 137-146.
- Weiser, Hannah, et al. "Individual Tree Point Clouds and Tree Measurements from Multi-Platform Laser Scanning in German Forests." *Individual Tree Point Clouds and Tree*

- Measurements from Multi-Platform Laser Scanning in German Forests, vol. 14, no. 7, 5 July 2022, pp. 2989–3012, <https://doi.org/10.5194/essd-14-2989-2022>.
- Wielgosz, M., Puliti, S., Wilkes, P., & Astrup, R. (2023). Point2Tree (P2T)—Framework for parameter tuning of semantic and instance segmentation used with mobile laser scanning data in coniferous forest. *Remote Sensing*, 15(15), 3737.
- Wu, J., Man, Q., Yang, X., Dong, P., Ma, X., Liu, C., & Han, C. (2024). Fine Classification of Urban Tree Species Based on UAV-Based RGB Imagery and LiDAR Data. *Forests*, 15(2), 390.
- Xiang, Z., Li, T., Lv, Y., Wang, R., Sun, T., Gao, Y., & Wu, H. (2024). Identification of Damaged Canopies in Farmland Artificial Shelterbelts Based on Fusion of Unmanned Aerial Vehicle LiDAR and Multispectral Features. *Forests*, 15(5), 891.
- Yarak, K., Witayangkurn, A., Kritiyutanont, K., Arunplod, C., & Shibasaki, R. (2021). Oil palm tree detection and health classification on high-resolution imagery using deep learning. *Agriculture*, 11(2), 183.
- Ye, H., Huang, W., Huang, S., Cui, B., Dong, Y., Guo, A., ... & Jin, Y. (2020). Recognition of banana fusarium wilt based on UAV remote sensing. *Remote sensing*, 12(6), 938.
- Yel, S. G., & Tunc Gormus, E. (2023). Exploiting hyperspectral and multispectral images in the detection of tree species: A review. *Frontiers in Remote Sensing*, 4, 1136289.
- Yun, T., Jiang, K., Li, G., Eichhorn, M. P., Fan, J., Liu, F., ... & Cao, L. (2021). Individual tree crown segmentation from airborne LiDAR data using a novel Gaussian filter and energy function minimization-based approach. *Remote Sensing of Environment*, 256, 112307.
- Zhong, L., Cheng, L., Xu, H., Wu, Y., Chen, Y., & Li, M. (2016). Segmentation of individual trees from TLS and MLS data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(2), 774-787.

ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimimi Gelincik Orta Okulu'nda, Lise eğitimini ise Sinop Fen Lisesi'nde tamamladı. 2018 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başlayıp 2022 yılında 3,17 GNO ile mezun oldu. Yüksek lisans eğitimine 2022 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde başladı.

İş deneyimi olarak Sinop ilinde yer alan Sinop İl Özel İdaresi ve Sinop İl Kadastro Müdürlüğü kurumlarında stajyerlik deneyimi bulunmaktadır.

